

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

Gabnai Zoltán

Debrecen

2019

DEBRECENI EGYETEM
GAZDASÁGTUDOMÁNYI KAR

IHRIG KÁROLY GAZDÁLKODÁS- ÉS SZERVEZÉSTUDOMÁNYOK
DOKTORI ISKOLA

Doktori iskola vezető: **Prof. Dr. Balogh Péter** egyetemi tanár, DSc

SZENNYVÍZTELEPI TECHNOLÓGIÁK GAZDASÁGI
ÉRTÉKELÉSE, VALAMINT SZEREPE AZ ENERGIA-,
TÁPANYAG- ÉS SZÉNDIOXID-GAZDÁLKODÁSBAN

Készítette:

Gabnai Zoltán

Témavezető:

Prof. Dr. Bai Attila

egyetemi tanár

DEBRECEN

2019

A doktori értekezés betétlapja

SZENNYVÍZTELEPI TECHNOLÓGIÁK GAZDASÁGI ÉRTÉKELÉSE, VALAMINT SZEREPE AZ ENERGIA-, TÁPANYAG- ÉS SZÉNDIOXID-GAZDÁLKODÁSBAN

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
a Gazdálkodás- és szervezéstudományok tudományágban

Írta: Gabnai Zoltán

okleveles gazdasági agrármérnök

Készült a Debreceni Egyetem Ihrig Károly Gazdálkodás- és Szervezéstudományok doktori
iskolája (Agrárökonómiai és Vidékfejlesztés-tudományi programja) keretében

Témavezető: Dr. Bai Attila

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: Dr. Szakály Zoltán

tagok: Dr. Takács István

Dr. Farkas Ferenc

A doktori szigorlat időpontja: 2019. június 7.

Az értekezés bírálói:

Dr.

Dr.

Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: Dr.

tagok: Dr.

Dr.

Dr.

Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 20... ..

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	1
1. TÉMAFELVETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	3
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1. A víz- és szennyvízgazdálkodás jelentősége, fejlődése	8
2.2. A keletkező szennyvíz és szennyvíziszap mennyisége, hasznosítása	10
2.3. A tisztító telepek típusai, a méret befolyásoló hatása	13
2.4. A körforgásos gazdaság és a szennyvíztisztítás kapcsolódása	17
2.5. A szennyvíz energia- és tápanyagtartalma, hasznosítási lehetőségek	18
2.6. A lehetséges technológiai elemek és termékek köre, kapcsolódási lehetőségek	20
2.6.1. Szennyvízhő és áramlási energia hasznosítása	21
2.6.2. Szennyvíziszap-rothasztás után kogeneráció vagy biometán-előállítás	23
2.6.3. Szennyvíziszapkomposzt-hasznosítás és tápanyag-gazdálkodás	25
2.6.4. Energiaültetvényes biomassa-termelés és hasznosítás.....	26
2.6.5. Tisztított szennyvíz és füstgáz CO ₂ -tartalmának hasznosítása algás tavakban	30
2.6.6. Napelemes energiatermelés	31
2.7. Nemzetközi jó gyakorlatok	32
2.8. Energiafelhasználás a szennyvíztisztításban	33
2.9. A szennyvíztisztítás jogszabályi háttere, előírások és irányelvek	34
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	37
3.1. A számítások menete.....	39
3.2. Az alkalmazott módszerek	40
3.3. A felhasznált alapadatok, fajlagosok.....	41
3.3.1. A bemenő szennyvíz és a tisztított víz tápanyag-tartalma.....	41
3.3.2. Szennyvíztelepi biogáztermelés és -felhasználás	42
3.3.3. Fermentált iszap komposztálása és hasznosítása energiaültetvényen	43
3.3.4. Energiaültetvényen történő komposzt-hasznosítás és faapríték-termelés	43
3.3.5. Megtermelt biomassa felhasználása gázosító/pirolízis erőműben és CHP-ben, majd energia-önellátás és a többletenergia értékesítése	44
3.3.6. Napelemes energiatermelés és szennyvíztelepi alkalmazhatósága.....	45
3.3.7. Tisztított víz és keletkező füstgáz felhasználása algás tavakban.....	45
3.4. A gazdasági kalkulációkhoz felhasznált egyéb tényezők (árfolyam, egységárak)	46
3.5. A kalkulatív kamatláb és felhasznált input- és outputadatok árszínvonal-változásának meghatározása	46
3.5.1. Kalkulatív kamatláb.....	46
3.5.2. Bevételek és kiadások árváltozásának figyelembe vétele	47

3.6. A károsanyag-kibocsátás számításhoz felhasznált fajlagosok	48
4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTÉKELÉSE	49
4.1. Szennyvíziszap-rothasztás után kogeneráció vagy biometán-előállítás	52
4.2. Fermentált iszap komposztálása és kihelyezése energetikai ültetvényre.....	55
4.3. Energiaültetvényen történő komposzt-hasznosítás és faapríték-termelés.....	56
4.4. A megtermelt biomassza felhasználása gázosító vagy pirolízis erőműben és CHP-ben, majd energia-önellátás és a többletenergia értékesítése.....	61
4.5. Napelemes energiatermelés és szennyvíztelepi alkalmazhatósága.....	66
4.6. Tisztított víz és keletkező füstgáz felhasználása algás tavakban	70
4.7. Szennyvízhő hasznosítása a csatornában vagy a tisztítottvíz-kivezetőnél.....	71
4.8. A telep méret befolyásoló hatása az energia-önellátás megvalósítására	71
4.9. Rendszerszintű hatások az energia-, tápanyag- és CO ₂ -gazdálkodás terén	72
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK.....	76
6. AZ ÉRTEKEZÉS FONTOSABB MEGÁLLAPÍTÁSAI, ÚJ ILLETVE ÚJSZERŰ EREDMÉNYEI	84
ÖSSZEFOGLALÁS	87
IRODALOMJEGYZÉK	90
SAJÁT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE	108
TÁBLÁZATJEGYZÉK	112
ÁBRAJEGYZÉK	113
MELLÉKLETEK	114
NYILATKOZAT.....	117
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	118

BEVEZETÉS

„Ne követeljünk többet a Földtől.

Inkább kezdjünk többet azzal, amit a Föld nyújt.”

/Gunter Pauli: A kék gazdaság/

Magyarországon az ivóvízigény meghatározó hányadát, több mint 90%-át a felszín alatti, míg egytizedét a felszíni vizekből fedezzük. A vízkészlet állapota, annak minősége döntő fontosságú, amelyet a napjainkban jellemző fokozott emberi tevékenység igen komolyan veszélyeztet. Az intenzív mezőgazdasági és ipari tevékenység során, illetve a településeken keletkező szennyvíz környezet- és energiatudatos kezelése, tisztítása egyre inkább előtérbe kerül. Ezt bizonyítják az utóbbi időszakban egyre szigorodó környezetvédelmi előírások, vízvédelmi törekvések is.

A gazdasági fejlődéssel és az életkörülmények javulásával párhuzamosan a felhasznált víz, így a keletkező szennyvíz mennyisége is folyamatosan nő. Emiatt nagy fontossággal bír a megfelelő tisztító hatást kifejtő, modern, hatékony, ugyanakkor környezetileg is előnyös technológiák alkalmazása, mint a fenntartható vízgazdálkodás felé tett lépések.

Világszerte tapasztalható, hogy a népesség egyre nagyobb része költözik városokba és egyre nagyobb mennyiségű hulladékot termel, melynek jelentős (és nehezen kezelhető) része folyékony formában képződik. A kisebb településekkel szemben az itt működő ipari üzemek is nagy mennyiségű szervesanyagot bocsátanak ki, melynek kezelését a lakossági szennyvízzel együtt – lehetőleg automatizált és költséghatékony módon – kell megoldani. A folyamat során anaerob erjesztéssel és egyéb technológiai megoldásokkal megújuló energia is előállítható. Emellett komoly lehetőség rejlik a telepre érkező szennyvíz szerves anyagainak, valamint makro- és mikroelem-tartalmának hasznosításában is. Értekezésemben – a témakört a körforgásos gazdaság koncepcióján keresztül megközelítve – elsődlegesen ezen városi szennyvíztelepek energiatermelésben és tápanyag-gazdálkodásban betöltött lehetőségeivel és sajátosságaival foglalkozok, kitérve a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésben betöltött szerepükre. A keletkező szennyvíz tisztítására, kezelésére napjainkban technológiák széles köre ismert és alkalmazott, a hagyományos, legszélesebb körben alkalmazott eljárásoktól kezdve az innovatív, újszerű, illetve természetközeli szennyvíztisztítási megoldásokig. Munkám elején kitérek az egyes – Magyarországon legszélesebb körben alkalmazott – eljárások sajátosságaira is, amelyek alapvetően meghatározzák az energetikai és tápanyag-gazdálkodási lehetőségeket.

A szennyvízre alapozott telepi energia-önellátás, különböző kiegészítő megoldásokkal és technológiákkal, valamint pótlólagos befektetésekkel megvalósítható cél, jellemzően a szennyvíziszap rothasztását alkalmazva. Ugyanakkor a nagy mennyiségben rendelkezésre álló (kierjedt) szennyvíziszap hasznosítása komoly kihívás elé állítja a telepeket. Ennek oka, hogy – ha még az adott ország jogszabályi környezete lehetővé is teszi a mezőgazdasági felhasználást – gyakori a termelők elzárkózása, emellett magas a nagy nedvességtartalmú iszap kihelyezési költsége is. A víz-energia-tápanyag hármas mindegyikéhez szorosan kapcsolódik a szennyvíztisztító tevékenység, így a tisztítás hatékonysága, minősége és egyéb jellemzői hatással vannak a környezetre, a társadalomra és a gazdaságra is.

1. TÉMAFELVETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Richard Smalley Nobel-díjas kutató az évezred elején rangsorolta a 21. század következő 50 évében jelentkező tíz legfontosabb globális kihívást, ezek között kiemelve az energiaellátás biztonságát, a víz- és élelmezés-biztonságot, valamint a környezetvédelmet (SMALLEY, 2003). Az elkövetkező évtizedekben világszinten az energia-, a víz- és az élelmiszerigény jelentős emelkedésére lehet számítani, amely komoly kihívás elé állítja a fejlődő és fejlett országokat egyaránt. A nemzetközi szervezetek arra hívják fel a figyelmet, hogy az említett területeket együttesen, egymással összefüggésben szükséges kezelni, vagyis nem állítható fel fontossági sorrend a vízgazdálkodás, az energiagazdálkodás és az élelmiszertermelés területei között (UNESCO, 2019).

A fosszilis erőforrások és mezőgazdasági, ipari nyersanyagok egyre fokozódó kitermelése, valamint a felhasználásukat kísérő környezetszennyezés számos kihívás elé állítja az emberiséget. Az utóbbi években egyre nagyobb figyelem irányult mind a folyamatokat kísérő károsanyagkibocsátás-csökkentésének lehetőségeire, mind az alternatív energiaforrások és nyersanyagok felhasználására. A körforgásos gazdaság, valamint a kék gazdaság koncepciók lényege a különböző szinteken értelmezett körfolyamatok maximális kihasználásában rejlik. Dolgozatom keretében céloom kapcsolódni az Európai Unió (továbbiakban: EU) körforgásos gazdaságra vonatkozóan megfogalmazott irányelveihez és célkitűzéseikhez a fenntartható, „low-carbon” és erőforrás-hatékony gazdaság kialakítása érdekében. A témakör fontosságát és aktualitását adja, hogy az utóbbi években az Európai Unió tagállamai ambiciózus intézkedéseket fogadtak el annak érdekében, hogy a hulladékokkal kapcsolatos uniós jogszabályok az EU szélesebb körű körforgásos gazdaság-politikájának részeként megfeleljenek a jövőbeli kihívásoknak.

Az EU egyre komolyabb lépéseket tesz az üvegházhatású gázok (továbbiakban: ÜHG-gázok) kibocsátásának csökkentése érdekében is. Ennek része a közcélú erőművek, fűtőművek és ipari felhasználás felügyelete, valamint a CO₂-kvótakereskedelem működtetése. Az ÜHG-kibocsátás további lépéseként az Európai Parlament (EP) és a Tanács 2017 decemberében kötött előzetes megállapodást a közös kötelezettségvállalásról szóló rendeletről, amelynek célja, hogy a 2021–2030-as időszakban még tovább csökkenjen az üvegházhatású gázok kibocsátása az uniós kibocsátás-kereskedelmi rendszer hatályán kívül eső ágazatokban. Az EU kitűzött célja, hogy 2030-ra 40%-kal csökkentse a károsanyag-kibocsátást az 1990-es adatokhoz képest (EP, 2017). Ez azt jelenti, hogy uniós szinten 30%-kal kell csökkenteni a szennyezést a 2005-ös adatokhoz képest szinte az összes ágazatban (Magyarország 7%-os károsanyagkibocsátás-csökkentési célt

vállalt) (EP, 2018). Az előzőekre azért is szükség van, mert a kibocsátás-kereskedelmi rendszerben nemzeti szinten csak a legnagyobb kibocsátók vesznek részt. Ez hazai szinten valamivel kétszáznál több vállalatot jelent, EU-s szinten pedig 12 ezret. A Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Tervében megfogalmazottak szerint a megújuló energiaforrások részarányának 14,65%-ra növelését vállalta, amely arány további növelésére lesz szükség a jövőben, amennyiben tartani szeretnénk akár a Párizsi Klímaegyezményben, akár a Nemzeti Fenntartható Fejlődési Keretstratégiában kitűzött célokat. A hagyományos energiaforrásokról a megújuló, illetve tiszta energiákra való áttérés fontossága tehát megkérdőjelezhetetlen.

Meglátásom szerint az elvégzett kutatómunka szükségességét indokolja a különböző EU-s és hazai megújulóenergia-termelési és -hasznosítási, energiahatékonysági és károsanyagkibocsátás-csökkentési célok teljesítésének „kényszere”, amelyhez jelentős mértékben járulhat hozzá a megfelelően előkészített és kialakított szennyvíz-gazdálkodási tevékenység.

A bioenergetikához és hulladék-gazdálkodáshoz kapcsolódó kutatási témám jól illeszkedik az Ihrig Károly Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola „A fenntartható fejlődés agrárökonómiai és vidékfejlesztési összefüggései” nevű alprogramjába, valamint a DE-GTK megújuló energetikai, környezetvédelmi kutatásainak profiljába. A dolgozat témaköre alapján hiánypótlónak tekinthető, hiszen a szennyvíztisztítási technológiák, és a kapcsolódó energetikai, tápanyag-gazdálkodási és károsanyagkibocsátás-csökkentési lehetőségek kapcsolódásának, és gazdasági vetületének témakörében összefoglaló jellegű munka kutatásaim szerint Magyarországon nem készült eddig.

Dolgozatomban célom egy olyan – a fenntarthatósági törekvések támogatására összpontosító – elemzés megvalósítása, amelyben a meghatározott terület fókuszpontba állításával egyidejűleg érvényesülnek a „hulladékból érték” és a „kötelezettségből lehetőség” irányelvek.

A természetközeli, élőgépes és eleveniszapos technológiájú szennyvíztisztító telepeken tett látogatásaim alkalmával az volt a tapasztalatom, hogy a telepek alaptermészetűje, kialakítása nagymértékben befolyásolja az energia- és a tápanyag-gazdálkodás, valamint a károsanyagkibocsátás-csökkentés terén adódó lehetőségeket.

Disszertációmban ezen lehetőségek feltárását, potenciál-becslést és egyes lehetőségekre vonatkozó gazdaságossági elemzést tűztem ki célul, a napjainkban egyre inkább előtérbe kerülő körforgásos gazdaság koncepcióhoz illeszkedően.

A szennyvíztisztítási tevékenységre irányuló kutatómunkám során a hazai és nemzetközi szakirodalom megismerése, számos tisztító telep meglátogatása, működésük tanulmányozása és a témakörben jártas szakemberekkel történő szakmai konzultációk alapján az a meglátásom, hogy a tisztítótelepi technológiai fejlesztések – főként az utóbbi időszakban – rendkívül felgyorsultak. Az egyes alaptermészetek, valamint azok különböző változatainak vizsgálata helyett ebből kifolyólag az olyan egyéb kiegészítő technológiai lehetőségekre, azok feltérképezésére és az elérhető hatások számszerűsítésére fókuszálok, amelyek komplex módon, a körfolyamatok kihasználásával járulnak hozzá a fenntartható anyag- és energiagazdálkodás megvalósításához, továbbá a károsanyag-csökkentési célok eléréséhez.

A szennyvíziszap-hasznosítási lehetőségek ökonómiai és környezeti szempontú vizsgálatára irányuló kutatómunka elvégzésének szükségességét indokolja a Szennyvíziszap Kezelési és Hasznosítási Stratégia 2014-2023 (a továbbiakban: Stratégia) előrejelzése, amely szerint a szennyvíziszapok mennyisége fokozatosan növekszik majd (OVF, 2014). A dokumentum a következő tíz évre vetítve kb. 10%-os növekedést prognosztizál.

Tényként említhető meg, hogy a szennyvíztisztítási költségek jelentős hányadát teszi ki az iszapkezelés, ami elérheti annak 40-50%-át. A szennyvíztelepen kívüli iszapkezelési folyamatok nagy részben a privát szektor ellenőrzése alá kerültek, kiszolgáltatva azt a piaci viszonyoknak. Ennek következtében hazánkban a kezelési költségek lényegesen megnöttek, meghaladva a nyugat-európai költségeket (LIGETVÁRI – ZSABOKORSZKY, 2015).

Az előzőekben részletezett témakörhöz illeszkedően **kutatásom célkitűzése** a következő kérdések tudományos igényességű megválaszolása:

1. Milyen lehetőségek állnak rendelkezésre a hagyományos eleveniszapos technológián alapuló, továbbá az élőgépes és a természetközeli tisztító technológiák esetében energetikai önellátás részleges/teljes megvalósítása vagy piacképes termék-előállítás céljából, kapcsolódva a körforgásos gazdaság koncepciójához? Milyen hatással van az üzemméret és a technológia a vizsgált témakörökre?
2. Milyen előnyei és hátrányai, valamint környezeti és gazdasági sajátosságai vannak az egyes kiegészítő technológiáknak és eljárásoknak a szennyvíz-gazdálkodásban energetikai, tápanyag-gazdálkodási és károsanyag-kibocsátási szempontból?
3. Milyen potenciál rejlik országos szinten a feltérképezett kiegészítő eljárásokban az energia-tápanyag-károsanyag hármast tekintve?

4. Milyen feltételek mellett ártalmatlanítható a legnagyobb arányban alkalmazott eleveniszapos technológiájú telepeken keletkező szennyvíziszap, a lehető legteljesebb mértékben hozzájárulva a fenntarthatósági törekvésekhez?

A célkitűzésekkel összhangban a **hipotéziseim** a következők:

H1 – A hagyományos technológiájú szennyvíztisztító telepek gazdaságos működése jellemzően nagyvárosi környezetben, illetve méretekben képzelhető el a teljeskörű termékhasznosítás és a méretgazdaságosság miatt. Továbbá ezeken a telepeken legkedvezőbbek a lehetőségek az energia-tápanyag-károsanyag hármast tekintve.

H2 – A szennyvíztisztítási tevékenység gazdasági és környezeti fenntarthatósága jelentős mértékben javítható – üzemmérettől függően különböző – kiegészítő technológiák rendszerbe integrálásával, és ezek lehetővé teszik a körforgásos gazdaság koncepciójának megvalósítását.

H3 – A kiegészítő technológiák közép- és hosszú távon hozzájárulnak az országos klímavédelmi törekvésekhez és a gazdasági fenntarthatósághoz is.

H4 – A szennyvíziszap-hasznosítás és ezzel egyidejűleg az energetikai önellátás leghatékonyabban fás szárú energetikai ültetvényekkel oldható meg.

A kutatási célokhoz rendelt feladatok a célkitűzések sorrendjében az alábbiak:

1. A szennyvíztisztítási tevékenység világszintű és hazai viszonyainak, helyzetének és sajátosságainak feltárása. A szennyvíz és szennyvíziszap átlagos összetételének, valamint az alaptevékenység(ek)re jellemző technológiai fajlagosok, input és output árak összegyűjtése.

2. A lehetséges kiegészítő tevékenységek feltérképezése, az eljárások sajátosságainak, technológiai fajlagosainak, továbbá az input és output árak összegyűjtése.

3. A telepméret befolyásoló hatásának, valamint a kiegészítő lehetőségek hazai létjogosultságának megítélése korábbi kutatások alapján, és ezek alapján egy újszerű komplex rendszer, körfolyamat megtervezése a keletkező iszap hasznosítása és egyéb lehetőségek rendszerbe integrálása által.

4. Gazdasági modellépítés, kapcsolódási lehetőségek, alternatívák kiválasztása és azok értékelése, elemzése.

5. A fentiek alapján potenciál-becslés egységmétrétre vetítve és gazdasági elemzések (költség-haszon elemzés, beruházás-gazdaságossági elemzés, komparatív analízis, érzékenység-

vizsgálat, küszöbérték-vizsgálat) elvégzése a szennyvíz-gazdálkodás bizonyos kiegészítő technológiai elemeire vonatkozóan.

6. Energia-önellátási és -termelési, valamint tápanyaghasznosítási, károsanyagkibocsátás-csökkentési lehetőségek elemzése.

7. A szennyvíz-gazdálkodás lehetséges hazai szerepének meghatározása, becslések elvégzése a fenntarthatósági, energetikai és károsanyagkibocsátás-csökkentési célokhoz kapcsolódóan.

8. Annak becslése, hogy a keletkező szennyvíziszap-mennyiség teljes egészének komposztként történő hasznosítása mekkora területen valósítható meg energetikai növénytermesztés céljából.

9. Az energiaültetvényes és napelemes energiatermelés lehetőségei és korlátai, valamint a lehetséges hatások számszerűsítése a szennyvíztisztító tevékenységhez kapcsolódóan.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A víz- és szennyvízgyártás jelentősége, fejlődése

Napjainkban a népesség- és életszínvonal-növekedés következtében folyamatosan nő a felhasznált vízmennyiség. Jelenleg a globális vízfelhasználás 70%-áért a mezőgazdaság felel, míg 11% a települési, lakossági felhasználás, emellett 19% az ipari vízigény részaránya (UNESCO, 2017). Ezzel szemben folyamatosan nő a vízhiány mértéke, amit csak fokoz az éghajlatváltozás és a fogyasztói szokások megváltozása (pl. „víz-intenzív” ételek, pl. húsfogyasztás előtérbe kerülése a fejlődő országokban is). A 21. században a vízhiány az egyik legnagyobb globális problémának számít: a FAO szerint 2025-re várhatóan kb. 1,8 milliárd ember fog valós, fizikai vízhiánnyal sújtott területen élni (FAO, 2018).

Másik tendencia, hogy a népesség egyre nagyobb hányada költözik nagyvárosokba, a város lakó népesség aránya globálisan meghaladja az 50%-ot, míg hazánkban ez közel 70%-ra tehető (KOVÁCS, 2017). A falvak és a városok szennyvíz-gazdálkodási problémái, az alkalmazandó technológia lehetőségei nagymértékben különböznek, nemcsak az eltérő méret, és az ellátandó regionális feladatok, hanem a különböző jövedelemszint és szennyvízminőség miatt is. A falvakban emiatt a kisebb méretű, illetve természetközeli, korlátozottabb hatékonysággal jellemezhető tisztítási megoldások, míg a nagyvárosokban – a képződő koncentráltabb, nagyobb mennyiségű és ipari anyagokkal szennyezett szennyvíz termelődése miatt – a nagyméretű automatizált, döntően eleveniszapos technológiájú szennyvíztisztító üzemek a jellemzőek (BODÁNE KENDROVICS, 2018). Ugyanakkor mások a nagyüzemekkel szemben támasztott elvárások is, a hulladékgazdálkodási feladatok ellátásán kívül legtöbb helyen megjelenik az anaerob elgázosítás révén a hő- és villamosáram-termelés, esetenként (pl. Zalaegerszegen) pedig a helyi közlekedés igényeinek részbeni kiszolgálása is (HORÁNSZKY, 2012).

A megfelelő minőségű ivóvíz biztosításának, valamint a fenntartható vízgazdálkodásnak alapfeltétele a megfelelő – az alapvető tisztítási funkcion túllepő – szennyvíztisztítási tevékenység megvalósítása (GABNAI – GÁL, 2016).

Ezen szennyvíztisztítási tevékenység a kezdetektől napjainkig folyamatos – eleinte igen lassú, majd gyorsuló – fejlődésen megy keresztül. Igaz ez az alkalmazott alaptechnológiákra és kiegészítő eljárásokra is. A szennyvíztisztítás már az ősi (egyiptomi, római) kultúráknál is megjelent. Az utóbbi két évszázadban került mindinkább előtérbe az ártalmatlanítás és elhelyezés fontossága, kiváltképp a fejlett országokban, ahol a környezetvédelem nagyobb teret kap. A fejlett világ nagyvárosaiban már az 1800-as években is jelentős csatornahálózat-

kiépítések történtek, ugyanakkor a szennyvizet hosszú ideig kivezették a városokból és megtisztítását a természetes vízfolyásokra bízták (WIESMANN et al., 2007). A fejlődő országok nagyvárosaiban a keletkező szennyvíz jelentős részét viszont még ma is a legközelebbi felszíni vízfolyásba engedik (UNESCO, 2017). Az ágazat fejlődésének kezdetén a lakossági és ipari szennyvizek tisztítása minimális befektetéssel, kényszerjelleggel történt, és csak a külső ráhatások (hatóságok felügyelete, ellenőrzése) eredményeként kezdődött el a szennyvíztisztítás minőségének javulása. A tisztító tevékenység fejlődéséhez a környezet vissza nem fordítható minőségromlása, valamint ennek kézzel fogható hatásai (járványok, megbetegedések) és azok érzékelése, dokumentálása és a szennyvízzel való összefüggésbe hozása vezetett. Elkezdett fejlődni a tisztítótechnológia is a rácsok és szűrők, majd ülepitők alkalmazásával (mechanikai tisztítás), amely által a kémiai oxigénigényben (KOI¹) vagy biológiai oxigénigényben (BOI²) mérhető szennyező anyagok egyharmada ülepedett ki a szennyvízből. Ezt követően került sor a biológiai tisztítás jelentős fejlődésére (SICKERT, 1998), a városokhoz közeli folyószakaszok és tavak jelentős szennyezettsége, valamint a környező flóra és fauna pusztulása miatt azonban további szűrési, tisztítási eljárás vált szükségessé. A csepegtetőtestes, szűrőközeges eljárás alkalmazása angliai kifejlesztését követően az 1950-es évekig uralkodott. Ezt követte a nagyobb városok esetében jelentősen hatékonyabb – napjainkban is uralkodó – eleveniszapos tisztítás előtérbe kerülése és intenzifikálása. Az ugrásszerű fejlődés tehát a XX. század második felében kezdődött a környezeti veszélyek azonosítását követően. Ekkor kezdtek megjelenni, valamint rohamosan fejlődni a szennyvíz-ágazatban napjainkban általánosan alkalmazott mérési eszközök és paraméterek (pl.: biológiai oxigénigény (BOI), kémiai oxigénigény (KOI), vagy a szerves széntartalom (TOC), illetve az egyedi komponensek) (HENZE et al., 2008). Ezzel párhuzamosan kezdődött meg a komolyabb, tudományos megalapozottságú tapasztalatgyűjtés és kísérletezés az aerob és anaerob eljárások, iszapkezelési megoldások, valamint azok termékeinek és melléktermékeinek megismerésére irányulóan. Megállapították, hogy az anaerob iszapstabilizáción átesett, víztelenített iszap más anyagokkal együtt történő komposztálása jól felhasználható a mezőgazdaságban, valamint, hogy az iszap rothasztása során keletkező biogáz fűtésre és villamos energia előállítására is hasznosítható (GRANDO et al., 2017). Az 1960-as, '70-es években már általánosan ismertté és alkalmazottá vált az

¹ KOI: kémiai oxigénigény, a szennyvíz szerves anyagának a szabványos körülmények között történő – bikromátos – oxidációjánál jelentkező oxigénigény.

² BOI: biológiai oxigénigény, a szennyvíz szerves anyagának a vizes fázisból mikroorganizmusok révén történő aerob eltávolításának oxigénigénye.

eleveniszapos szennyvíztisztítás, amely a mechanikai tisztítást követő nagyterhelésű eleveniszapos lépcsőből, majd azt követő nitrifikációs egységből állt. A '80-as években viszont az eutrofizáció (és az ezt kísérő algavirágzás vagy algarobbanás) jelenségének fokozódását észlelték számos befogadónál, amely a vegyszeres kicsapatás helyett a biológiai foszfor-eltávolítás fejlesztési igényét vonta maga után. Ez vezette rá a kutatókat a fokozott foszfor- és nitrogén-eltávolítás érdekében a szerves szén-felhasználás optimalizálásának szükségességére, amely fejlesztése és kísérletezése napjainkban is folyamatban van (Internet 1). Az utóbbi évtizedekben a hagyományos eleveniszapos eljárás mellett megjelentek annak különböző változatai. A folyamatos üzemű technológia mellett megjelent a szakaszos üzemű SBR (Sequencing Batch Reactor) eljárás is, amelyet általában kisebb, napi néhány ezer m³-t (max. 20 000 m³/nap) fogadó telepeken alkalmaznak (GARAI, 2017). Emellett megjelentek más konstrukciók, hordozó felületek (biofilmes és fixfilmes rendszerek) és egyéb innovatív tisztítási eljárások is, különböző megkötési megoldások alkalmazásával.

Kijelenthető, hogy habár az utóbbi 20-30 évben az elméleti ismeretek jelentős bővülésének lehettünk tanúi, a kutatási tevékenység folytatása elengedhetetlen a minél hatékonyabb, környezeti és lehetőleg gazdasági szempontból is minél inkább fenntartható tisztítási tevékenység érdekében. Igaz ez az energia-gazdálkodás és tápanyag-gazdálkodás fejlesztése, helyi adottságoknak megfelelő kiaknázása esetében is.

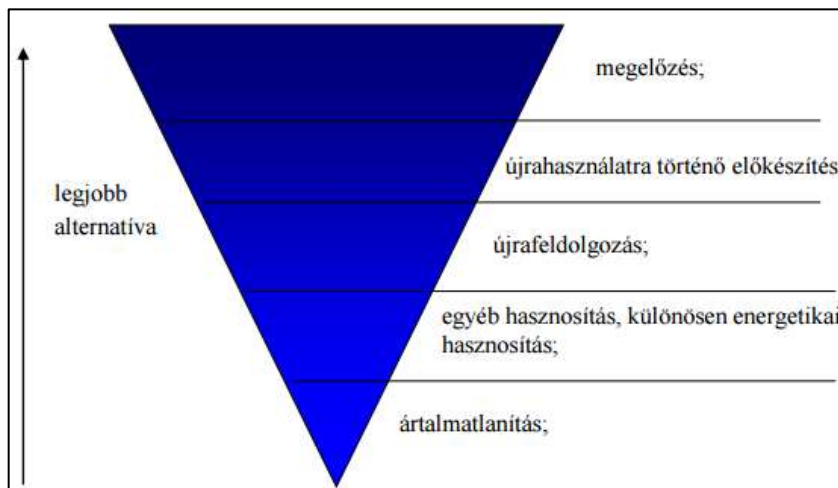
Napjainkban is elmondható, hogy óriási különbségek vannak a keletkező szennyvíz tisztítási aránya és határfoka tekintetében.

2.2. A keletkező szennyvíz és szennyvíziszap mennyisége, hasznosítása

A FAO (2018) adatai alapján közel háromszáz milliárd m³ szennyvíz keletkezik egy év alatt a Földön. Ennek tisztítását illetően azonban elmondható, hogy a fejlett, jó gazdasági helyzetben lévő országokban kedvező (átlagosan 70%) a megtisztított víz aránya, míg a közepesnek minősülő, illetve fejlődő és elmaradott, szegény országokban ennek aránya átlagosan mindössze az összes keletkező szennyvíz egyharmada, egynegyede (SATO et al., 2013). Ennek megfelelően a becslések szerint világszinten a termelő szennyvíz körülbelül 80%-a kerül ki a környezetbe megfelelő kezelés, tisztítás nélkül (UNESCO, 2017).

A szennyvíztisztító telepek számát tekintve a kontinensek közül Európa jár az élen, nagyságrendileg 47 ezer teleppel (FAO, 2016). Észak-Amerika a második, míg az országok rangsorában az Amerikai Egyesült Államok területén találhatóak szennyvíztisztító létesítmények a legnagyobb számban. Hazánkban a Központi Statisztikai Hivatal nyilvántartása alapján évente 450-500 millió m³ kommunális szennyvíz tisztítása történik a közüzemi

szennyvíztisztító telepeken. Ehhez kapcsolódóan az egy főre jutó átlagos szennyvíziszap-termelés 9 kg/fő/év. A szennyvíztisztítási tevékenységgel kapcsolatos újrahasznosítási követelményként fogalmazhatjuk meg a szennyvízben megjelenő, hasznosítható mikro- és makroelemek ésszerű felhasználására való törekvést, amely összhangban van az Országos Hulladékgazdálkodási Tervben (2014-2020) megfogalmazott célkitűzésekkel (1. számú ábra):

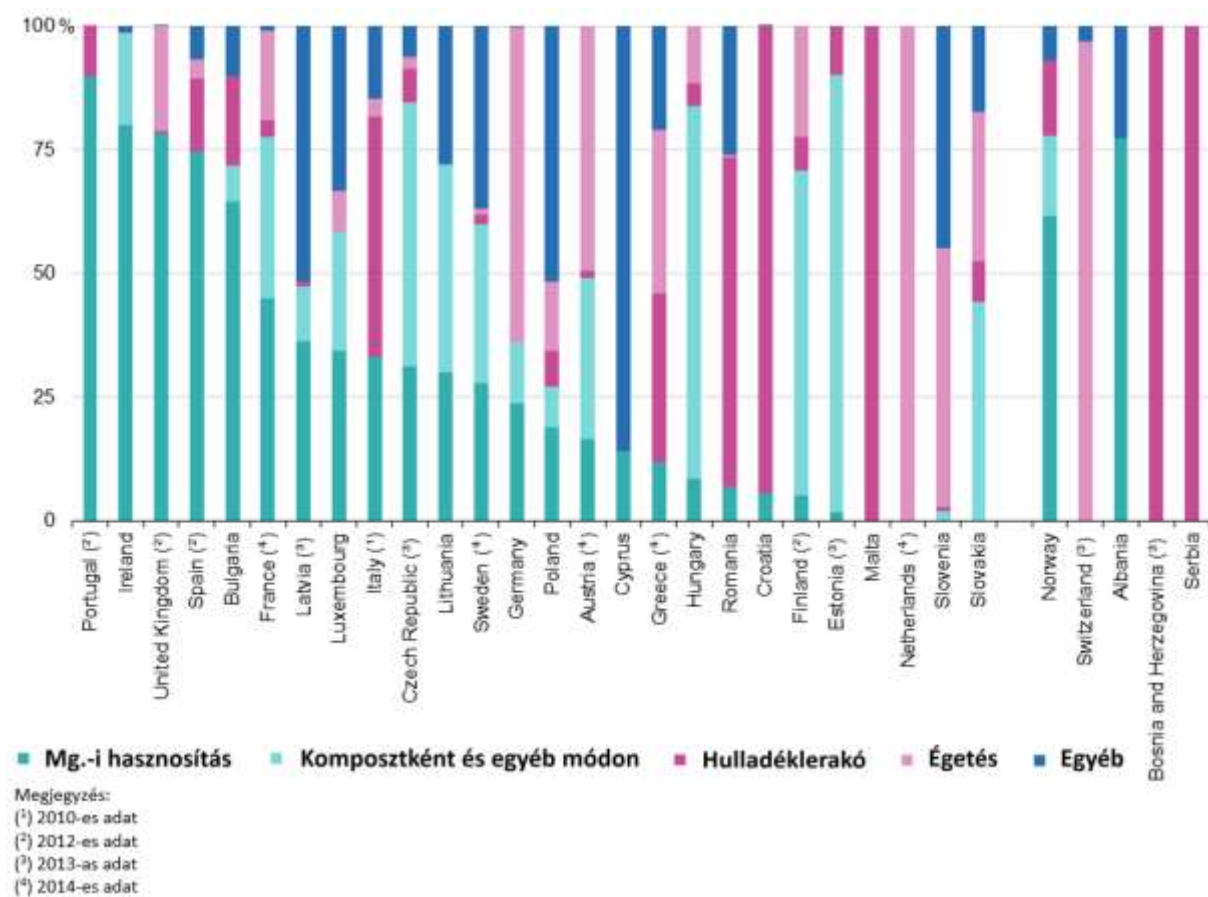


1. ábra: A hulladékgazdálkodás hierarchiája

Forrás: I2

Az iszaphasznosításra a szennyvíztisztítás szerves részeként érdemes tekinteni, amelynek felhasználása az adott ország, illetve terület sajátosságaitól, körülményeitől függ. A technológiák széles köre ismert az általánosan alkalmazott komposztálástól és biogáz-termeléstől kezdve a termikus eljárásokon (SAMOLADA et al., 2014) át (pl. égetés, pirolízis, gáztermelés az iszap önmagában vagy különféle melléktermékekkel, hulladékkal történő keverését követően) a cementgyártásban (LIN et al., 2012), és hidrogén-termelésben történő felhasználásig (FYTILI – ZABANIOTOU, 2008; KIM et al., 2004; IACOVIDOU et al., 2012).

Az EUROSTAT legfrissebb nyilvántartása alapján (a 2. ábrán látható módon) országonként igen eltérő az egyes hasznosítási módok aránya.



2. ábra: A kommunális szennyvíztisztítókból származó szennyvíziszap ártalmatlanításának módjai az EU országokban

Forrás: EUROSTAT (2017)

Az Európai Unióban a legszélesebb körben alkalmazott iszap-hasznosítási, iszapkezelési megoldások: a mezőgazdasági hasznosítás (közvetlenül vagy komposztként), a hulladéklerakóba történő szállítás, a talajjavítási és talajremediációs célból történő kijuttatás, illetve az égetés. Az EU-s országokban nagy eltérések vannak a hasznosítási módok tekintetében, jellemzően az adott országban aktuális környezetvédelmi, jogszabályi előírásoktól függően. Magyarországon döntően a mezőgazdasági, komposztként történő hasznosítás alakult ki, emellett a hulladéklerakóba helyezés és égetés minimális mértékű (EUROSTAT, 2017).

Hazánkban tehát igen nagy jelentősége van az iszapok és a belőlük készült komposztok mezőgazdasági hasznosításának: a teljes mennyiség 38%-át, 68 000 t sz.a.³ mennyiséget hasznosítanak a mezőgazdaságban, ebből szántóföldön 30 000 t sz.a. mennyiséget. Az iszappal történő rekultiváció részesedése 46% (82 000 t sz.a.), míg az energetikai hasznosítás aránya

³ sz.a.: szárazanyag

mindössze 5%-os (leszámítva a rothasztásos biogáztermelést). Emellett a végleges lerakás elenyésző, 2%-os mértékű (OVF, 2014). Hozzá kell tenni, hogy a rekultivációt igénylő területek beszűkülése, valamint a mezőgazdasági területekre való kihelyezhetőség előírásainak esetleges szigorodása tovább szűkítheti a kapacitásokat, így mindenképpen célszerű az egyéb alternatívákra vonatkozó becslések elvégzése. A szennyvíziszap komposztként történő kihelyezését indokolják annak kedvező hatásai növénytáplálási, talajjavítási és környezetvédelmi szempontból is. A komposztok mezőgazdasági hasznosítása során a folyékony és víztelenített szennyvíziszappal összehasonlítva: (1) megnöveli a talaj kation cserélő képességét; (2) talajszerkezetet javító talajszemcséket képez; (3) csökkenti a talajeróziót; (4) javítja a talajok vízgazdálkodását; (5) lassítja a tápanyagok felszabadulását; (6) puffer hatásával lassítja a tápanyag kilúgozódását; (7) megakadályozza a gyors pH változást. Növénytáplálás szempontjából a következő előnyei vannak: (1) kiegyensúlyozottabb tápanyag-feltáródást biztosít (kisebb a kimosódás veszélye); (2) nagy adszorpciós képessége miatt növeli a talaj tápanyagtároló kapacitását (OVF, 2014).

A Stratégia alapján a különböző szennyvíziszap-hasznosítási módok (iszap mezőgazdasági hasznosítása, komposzt mezőgazdasági hasznosítása, rekultivációs hasznosítás, lerakás, energetikai hasznosítás (monoégetés)) közül az eltérő kapacitású (2 000 LEÉ⁴ alatti, 2 000-10 000 LEÉ közötti, 10.000-50.000 LEÉ közötti, 50.000-200.000 LEÉ közötti, 200.000 LEÉ feletti) telepeken a beruházási költségeket és a működési költségeket is figyelembe véve a legnagyobb telepeken termelődő komposzt mezőgazdasági hasznosítása számít a gazdaságilag leginkább kedvező megoldásnak. Ezt követi az iszap mezőgazdasági hasznosítása, majd a rekultivációs hasznosítás.

2.3. A tisztító telepek típusai, a méret befolyásoló hatása

A tisztítási technológiákat DITTRICH (2016) alapján két csoportba sorolhatjuk: intenzív és extenzív technológiákra (1. táblázat).

⁴ LEÉ: A lakosegyenérték a szennyvízterhelés nemzetközileg elfogadott mértékegysége, a szennyvízkezelő berendezések méretezésére használatos egység, melyet egy lakos által egy nap termelt szennyvíz szervesanyag-tartalmából, illetve ennek lebontásához szükséges 5 napos biokémiai oxigénigényből eredeztetnek: BOI5 = 60 g/nap*lakos.

1. táblázat: A szennyvíztisztítási technológiák csoportosítása

1. Intenzív technológiák	2. Extenzív technológiák
<p>1.1. Eleveniszapos eljárások:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hagyományos • SBR • Oxidációs árok • Stb. <p>1.2. Fixfilmes eljárások:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Csepegtető testek • Merülő-tárcsás • Bioszűrők • Stb. 	<p>2.1. Szárazföldi rendszerek:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Szikkasztás • Talajszűrés, talajöntözés (lassú szűrés) • Szennyvíz-öntözés • Kavics és homokszűrők (gyors szűrés) • Gyökérszűrés szennyvíztisztítás <p>2.2. Vízi rendszerek:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Szennyvíztisztító tavak • Úszó v. lebegő vízi növényes rendszerek • Felszíni átfolyású wetlandek • Csörgedezettetés

Forrás: saját szerkesztés SZABÓ (2016) alapján

Az egyes természetközeli tisztítási megoldások az extenzív technológiák közé tartoznak és a természet öntisztulási képességén, folyamatain alapulnak. Ezek lehetnek szárazföldi-, illetve vízi rendszerek, továbbá speciális mesterséges lápok. A szárazföldi rendszerek (szennyvíz-öntözés, csörgedezettetés, szikkasztás) a szigorú környezetvédelmi előírások, határértékek miatt elsősorban azonban csak a szennyvíz utókezelésére, a tisztított szennyvíz elhelyezésére alkalmasak. A vízi rendszerek közül megemlíthetők a nyílt vízfelszínű, sorban elhelyezett lagúnák és tavak, valamint az úszónövényes megoldások. A következő csoport az ún. mesterséges lápok, amelybe a gyökérszűrés rendszerek, illetve a szabad felszínű lápok tartoznak (KVVM, 2006). A nyugati országokban számos jól működő példa ismert, Magyarországon ugyanakkor a KVVM 2005-ös nyilvántartása szerint mintegy 120-130 db természetközeli telep létezett, amelyek közel fele napjainkban már nem, illetve nem megfelelően üzemel. Ezen telepek jellemzője, hogy viszonylag alacsony ráfordítással valósíthatók meg, üzemeltetési költségeik minimálisak és a tájba illeszkednek. A természetközeli rendszerek körültekintő tervezés és gondos működtetés esetén megfelelő, egyben fenntartható alternatívát jelenthetnek a kedvezőtlen gazdasági helyzetben, csatornázatlan térségekben lévő kistelepülések számára (GRANT et al., 2009).

Az ún. „élőgépes” tisztítási technológia a fenti technológiák közül az intenzív eleveniszapos szennyvíztisztítás, valamint a természetközeli tisztítás (növényi és állati ökológiai közösség) kombinációja. A tisztító – amely tartalmazza a klasszikus anaerob-anoxikus-aerob láncolatot, továbbá rácson elhelyezett növényeket, és a mikroorganizmusokon kívül akár magasabb rendű állati szervezeteket is – egy üvegház jellegű épületben kap helyet (GRANT et al., 2012 IN:

VERES, 2015; GABNAI, 2014). Ily módon részben kompenzálva van a téli hőmérséklet- és határfok ingadozás, továbbá a szagirritáció is csökkenthető.

A fejlett országokban, így hazánkban is a települési szennyvizek tisztítása legnagyobb arányban az ún. eleveniszapos technológia alkalmazásával történik. Ennek három fokozata van, melyek különböző eljárások kombinációjából állhatnak össze.

1. Elsőfokú vagy mechanikai tisztítás

Ezen tisztítási lépés során történik a szennyvízben található nagyobb méretű úszó és lebegő anyagok elvátolítása rácsok, szűrők, illetve üleptető berendezések, homok-, olaj- és zsírfogók segítségével (VERES, 2015).

2. Másodfokú vagy biológiai tisztítás

A lépés során mikroorganizmusok segítségével történik a szennyvíz szerves anyagainak, tápelemeinek a lebontása, aerob vagy anaerob körülmények között. A biológiai fokozatot követően a szennyvíz tisztításának hatásfoka 80-90%-os is lehet (JUHÁSZ, 1977; ÖLLŐS - BIKFALVI, 1991; ÖLLŐS, 1992).

3. Harmadfokú, vagy kémiai tisztítás

A lépés során az előző tisztítási fokozatokat követően a szennyvízben maradó oldott ásványi anyagok egy részét, főként az eutrofizációt okozó növényi tápanyagokat, a nitrogént és a foszfort, valamint a szennyvízből más úton nehezen kivonható nehézfémeket és egyéb toxikus anyagokat távolítják el (GAJDOV, 2004).

Napjainkban Magyarországon a szennyvíztisztítás során az összes szennyvíz-mennyiség döntő hányadának (kb. 90%-ának) tisztítását a legkomolyabb elvárásoknak is megfelelő, III. tisztítási fokozattal végzik, kiegészítve a mechanikai és biológiai tisztítási lépcsőt. Ezzel ellentétben tíz évvel ezelőtt az arányok a következők voltak: 25% csak mechanikailag, 30% mechanikailag és biológiailag is, míg mindössze 35% volt az előzőkön kívül a III. tisztítási fokozattal is tisztítva (fokozott N és P eltávolítás kémiai módszerek bevonásával) (KSH, 2018).

Az alábbi, 2. táblázatban az eleveniszapos, az élőgépes és a természetközeli technológiák különböző szempontok szerinti összehasonlítását láthatjuk.

2. táblázat: A szennyvíztisztítási technológiák összehasonlítása

	Eleveniszapos	Élőgépes	Természetközeli
Gazdaságos méret, terhelés (LEÉ)	legkisebttől a legnagyobbig	jellemzően közepes méretű: 5 000 – 50 000 LEÉ (akár 1 000 – 2 000 LEÉ-től nagyvárosi méretekig)	kisméretű (max. 2-5 ezer LEÉ)
Fajlagos beruházási költség	magas	magas	kisebb
Fajlagos működtetési költség	magas	magas	kisebb
Keletkező iszap mennyisége	magasabb	relatív magas	alacsonyabb
Szagemisszió	minimális	nagyon minimális	minimális
Energia- és vegyszerigény	magasabb	relatív magas	alacsonyabb
Kezelőszemélyzet igény	magas	közepes	alacsony
Felhasznált mesterséges anyagok mennyisége	magas	magas	alacsony
Zajártalom	közepes	alacsony	alacsony
(Évszakonkénti) üzembiztonság	magas	magas	alacsony
Területigény	relatív alacsony	alacsony	magas
Átlagos szerves anyag leválasztási hatások	magas	magas	alacsony
Átlagos növényi tápanyag leválasztási hatások	magas	magas	alacsony
Hidraulikai ingadozásokra való érzékenység	magas	magas	alacsony
Szerves anyag terhelés ingadozásra való érzékenység	magas	magas	alacsony
Eszztétikai szempontok	kedvezőtlen	kedvezőbb	kedvezőbb
Az elfolyó szennyvíz minőségi ingadozásának mértéke	kismértékű	kismértékű	nagymértékű
Alkalmazhatóság	széles körű	széles körű	korlátozott (toxikus anyagokra érzékenyebb)
Energetikai lehetőségek	széles körű	korlátozott	korlátozott
Tápanyag-gazd. lehetőségek	széles körű	korlátozott	korlátozott
Víztisztítási hatások	relatív magas	magas	alacsony
Üzembiztonság	magas	magas	alacsony

Forrás: saját szerkesztés Dittrich (2016), 13-16 és saját adatgyűjtés alapján

A TESZIR (2018) nyilvántartása alapján az 574 db magyarországi telepből mindössze 25 db kapacitása 100 000 LEÉ (lakosegyenérték) feletti, ugyanakkor ezek a telepek így is az összes tisztítóképesség több mint felét képviselik. Általánosságban elmondható, hogy a szennyvíz döntő hányada a nagyobb méretű, jellemzően eleveniszapos technológián alapuló tisztító telepek által kerül megtisztításra: a néhány nagyobb telepen (28 db) keletkezik az összes szennyvíziszap közel 60%-a (TÓTH, 2017). Szennyvíztelepi biogáz-termelés 30 telepen történik, és – egy kivételtől eltekintve – az 50 000 LEÉ, valamint az azt meghaladó kapacitású telepeken van megvalósítva (GABNAI - BAI, 2018). Ezt erősíti meg KÁRPÁTI (2017), aki a biogáz-termelés gazdaságos megvalósíthatóságának alsó határaként a kb. 20-50 ezer LEÉ kapacitású telepeket jelöli meg. A nagyobb városokban működő telepeken elterjedt az iszap alapú biogáz-előállítás és -felhasználás, amellyel részben, vagy bizonyos esetekben akár egészben energetikai önellátás (villamosáram-igény és/vagy hőigény fedezése) is megvalósítható. Hazánkban jelenleg 81 db villamos áramot termelő biogáztelep található, ennek egyharmada működik szennyvíztelepen. Átlagos üzemméretük megközelítőleg 1 MWe, éves gáztermelő kapacitásuk összességében 1,2 PJ (PAN-LNG, 2016).

2.4. A körforgásos gazdaság és a szennyvíztisztítás kapcsolódása

A szennyvíz, mint energiában és tápanyagokban gazdag anyag hasznosítása fontos része lehet a fenntarthatósággal és a körforgásos, valamint zöld gazdasággal kapcsolatos hazai törekvések megvalósításának. Kiváltképp akkor, ha körfolyamatban gondolkodva minél teljesebb módon történik a rendszer kialakítása.

A körforgásos gazdaság magában foglalja mind az energetikai, tápanyag-gazdálkodási és CO₂-kibocsátáscsökkentési lehetőségeket, amelyek hozzájárulhatnak a környezetvédelmi és fenntarthatósági célokhoz. Az erőforráshiány, mint kulcs-tényező elsősorban korszerű hulladékgazdálkodási formákat fog eredményezni (KISS – HETESI, 2018). A körforgásos gazdaság azon koncepció, melynek során a termékek, anyagok (illetve nyersanyagok) a lehető leghosszabb ideig vesznek részt a gazdasági körfolyamatban, valamint amelynek során a hulladékok másodlagos nyersanyagként kerülnek felhasználásra, és ezt követően visszaforgathatók, újrahasznosíthatók. A hangsúly a veszteségek minimalizálásán, az újrafelhasználáson és az újrahasznosításon van (GEISSDOERFER et al., 2017). A körforgásos gazdaság alapelemei ebből következően úgy is ismertek, mint a 3R: reduce, reuse és recycle – csökkentés, újrafelhasználás és reciklálás (GHISELLINI et al., 2016). A koncepció tehát merőben eltér a lineáris gazdasági szemlélettől, amely az elvesz-termel-eldob modellen alapul (FOGARASSY et al., 2018) (3. ábra):



3. ábra: Nyitott és zárt anyagciklusú rendszerek

Forrás: EMF (2013) IN: FOGARASSY et al. (2018)

A körforgásos gazdaság és a szennyvíz-gazdálkodás kapcsolódási lehetőségeire, különböző energia- és tápanyag-gazdálkodási megoldások alkalmazására a „2.7. Nemzetközi jó gyakorlatok” fejezetben említék példákat. A különböző alkalmazási lehetőségek felkutatása az EU egyik kiemelt szakmai célkitűzése (EC, 2018).

2.5. A szennyvíz energia- és tápanyagtartalma, hasznosítási lehetőségek

A szennyvíz energia-tartalma

MCCARTY et al. (2011) és GUDE (2015) alapján a szennyvízben az energia három formában van jelen. Az USA-ban átlagosnak számító összetételű szennyvízre vonatkozóan a fajlagos elméleti energiamennyiség a következőképpen becsülhető:

1. a szerves szennyezőanyagok energiája: $\sim 1,79 - 1,93 \text{ kWh/m}^3$
2. növényi tápanyagok (N és P) energiája: $\sim 0,70 - 0,79 \text{ kWh/m}^3$
3. hőenergia: $\sim 7,00 \text{ kWh/m}^3$

A fenti értékeket MCCARTY et al. (2011) a szennyvízben jelen lévő szerves összetevőkhöz tartozó KOI (Kémiai Oxigénigény) érték (500 mg/l) alapján számította, 3,86 kWh/kg KOI

elméleti energiatermelő potenciált feltételezve. Magyarországon ettől kis mértékben magasabb ez az érték, töményebb a szennyvíz az egy főre eső alacsonyabb vízfogyasztásból adódóan. Kiegészítésként érdemes megjegyezni, hogy a nyers szennyvíz töménysége több tényezőtől függ (az ország, térség gazdasági helyzete, speciális termelő tevékenységei, vagy éppen a vízhiány függvényében).

WETT et al. (2007) leírja, hogy a szennyvíz több energiát tartalmaz, mint amennyi a tisztítóüzem villamos áram felhasználásához elegendő, és megfelelő technológia mellett a telep tisztító tevékenysége önfenntartó lehet, míg FILLMORE et al. (2014) szerint a szennyvíz a megtisztításához szükséges energiához képest annak akár ötszörösét tartalmazza.

A fentiekben megjelölt elméleti energiataralomhoz képest a gyakorlatban ténylegesen hasznosítható energia-mennyiséget ugyanakkor – a szennyvíz mennyisége és minősége mellett – alapvetően meghatározza az alkalmazott technológia, a kiegészítő eljárások lehetőségei és a telepméret is.

A szennyvíz tápanyagtartalma

Ahogy a szennyvizek fajlagos energiataralma, úgy makroelem-tartalma is eltérő lehet. KÁRPÁTI (2014) magyarországi átlagként a következő értékeket jelöli meg:

- TP (összes foszfor): 14-16 g TP/ m³ (mg/l)
- TKN: 91-112 g TKN/ m³ (mg/l)

(Összes Kjeldahl Nitrogén – az ammónium-N és a szerves-N összege)

A nagy mennyiségben keletkező szennyvíz tápanyag-tartalmának minél teljesebb hasznosítása alapelvárásként fogalmazható meg a jövőre vonatkozóan, tekintettel a foszfor- és nitrogén-készletek jelenlegi állapotára és a természetes forrásból történő talajerő-utánpótlás fontosságára.

A foszfátérc jelentőségét szemlélteti, hogy a kimerülő készletek miatt 2014-ben az Európai Bizottság által kritikus nyersanyagként került megjelölésre (EC, 2014). Habár a foszforforrások globális szinten még nem feltétlenül mondhatók szűkösek, számos olyan tényező van, amelyek arra ösztönöznek, hogy az EU figyelemmel kísérje az ellátás biztonságát érintő kérdéseket. A foszfor olyan makroelem, amellyel kapcsolatban óriási függőség jellemzi az EU-t: importfüggőségünk a 2010-es évek elején kb. 92%-os volt, ugyanis a foszfátérc kitermelése jelenleg néhány országra (Marokkó/Nyugat-Szahara, Kína és az Egyesült Államok) korlátozódik. A szakértői iránymutatások szerint a készleteket óvatosan kell kezelni, és nehéz pontosan megjósolni, hogy hosszú távon ki tudják-e elégíteni a keresletet. A települési

szennyvíz kezeléséről szóló irányelv előírja a foszfor szennyvízből történő eltávolítását, ugyanakkor az elem felhasználható formában történő kinyerése nem előírás. A szennyvízből történő foszfor-kinyerés technikájával kapcsolatosan folyamatos a fejlesztési tevékenység: lehetőség a struvit⁵ formájában történő eltávolítás, a szennyvíziszap elégetése és a hamu felhasználása, vagy éppen a szennyvíziszap megfelelő kezelést követő közvetlen, vagy komposztálást követő kijuttatása a földekre. A – gyakran adott ország által igen szigorú – környezetvédelmi előírások (elsősorban a nehézfémekre és toxikus anyagokra vonatkozóan) vagy éppen a költséges kinyerés számos esetben megakadályozza az előző eljárások alkalmazhatóságát (EB, 2013).

A szennyvíz nitrogéntartalmának hasznosításával jelentős mennyiségű nitrogén hatóanyag kiváltására adódhat lehetőség, mivel a nitrogénhatóanyag-tartalmú műtrágyák 97%-át ammóniából (NH₃) állítják elő, amelyet levegő, víz és szénhidrogének felhasználásával nyernek (IPCC, 2006). A szennyvíz nitrogén-tartalmának hasznosításával ezáltal hozzájárulhatunk a fosszilis tüzelőanyagok, szénhidrogének – elsősorban a földgáz – készleteinek megőrzéséhez, így bizonyos mértékben a kimerülési idő meghosszabbításához is.

2.6. A lehetséges technológiai elemek és termékek köre, kapcsolódási lehetőségek

Az alábbiakban a szennyvíztisztítási tevékenységhez energia- és tápanyag-gazdálkodás szempontjából közvetlenül kapcsolódó, illetve kapcsolható részterületeket ismertetem, az alábbi sorrendben:

- Szennyvízhő és áramlási energia hasznosítása
- Szennyvíziszap-rothasztás után kogeneráció vagy biometán-előállítás
- Szennyvíziszapkomposzt-hasznosítás és tápanyag-gazdálkodás
- Energiaültetvényes biomassza-termelés és hasznosítás
- Tisztított szennyvíz és füstgáz CO₂-tartalmának hasznosítása algás tavakban
- Napelemes energiatermelés

⁵ MAP (magnézium-ammónium-foszfát), vagy ásványi nevén struvit: a mezőgazdaságban műtrágyaként is alkalmazható, ugyanakkor a magas anyagköltség (magnézium) miatt a folyamat jelenleg nemversenyképes (KÁRPÁTI, 2011).

2.6.1. Szennyvízhő és áramlási energia hasznosítása

Ahogy korábban említésre került, a szennyvíz energiatartalmának legnagyobb – ugyanakkor korlátozottan hasznosítható – része a szennyvízhőben található. DULOVICS (2012) alapján elméletileg 1 m³ szennyvíz 1 °C-kal történő lehűléséből 1,16 kWh hőenergia nyerhető. A jelentős hőtartalom oka, hogy a fürdésből, mosásból és mosogatásból származó szennyvíz 35-65 °C hőmérséklettel hagyja el lakásunkat, ezt követően pedig a föld alatt áramlik a tisztítótelep felé. Ennek kapcsán – a hőenergiát hőcserélővel kivonva, majd hőszivattyúval a kellő hőfokra növelve és felhasználva – az alábbi hasznosítási módok állnak rendelkezésre: (1) a keletkezés helyén az épület csatornázásából; (2) a szennyvízcsatornából; (3) a szennyvíztisztító telepről elfolyó tisztított vízből történő hőhasznosítás. A nagy mennyiségben keletkező, relatíve állandó hőmérsékletű szennyvízhő energiahatékonysági értékei (COP – coefficient of performance, vagyis teljesítmény-együttható) lényegesen kedvezőbbek a talajhőnél és a rétegvíznél:

- fűtésekor (COP): 5,0-6,5, segédenergia figyelembevételével kb. 4,5,
- hűtésekor (EER⁶): 7,5-8,5, segédenergia figyelembevételével: kb. 6,5.

A földgáztüzelés COP-értéke ezzel összefüggésben 2,9-3,2.

DULOVICS (2012) leírja továbbá, hogy 1 MW teljesítményhez 3400 m³/nap szennyvízhozam szükséges, vagyis az épületek saját szennyvize nem elegendő a saját fűtés és hűtés megvalósításához. Az alkalmazható – magyar fejlesztésű – technológia beruházási költsége a becslések alapján kb. 1 millió EUR (ennek kétharmada a hagyományos energiakapacitás kiépítése, vagyis nagyságrendileg az összköltség egyharmadával drágább a megvalósítás). A technológia élettartama 15 év. A megtérülés átépítés esetén 8-10 év (120 000 EUR/év megtakarítás), míg új építés esetén 3-4 év a végfelhasználó energiaköltségéből adódó évi 20-40%-os mértékű megtakarítás következtében. A megoldással optimális esetben a nagyobb (600 mm átmérő feletti) főgyűjtők közelében lévő kereskedelmi egységek, valamint irodaházak teljes energiaellátása (hűtés és fűtés) biztosítható. Az eljárás a közvetlen költség-megtakarítás mellett természetesen hozzájárul a fosszilis energiahordozóktól való függőség csökkentéséhez és CO₂-megtakarításhoz is.

A hőenergia-nyerés gazdaságosságát elsődlegesen a következő tényezők biztosítják:

- legalább 15 l/s (1 296 m³/nap) lefolyás a csatornában,

⁶ EER: Energy Efficiency Ratio, vagyis energia hatékonysági arány.

- a szennyvíz hőmérsékletének megfelelése a szennyvíztisztító telepen,
- minimális hőigény 150 kW,
- a csatorna és az épületek távolsága általában 100-300 m, nem beépített területen 300 m.

A szennyvíz kedvező hasznosíthatósága és COP-értéke más hőforrásokhoz képest annak állandó hőmérsékletében rejlik. A Magyarországon megvalósult projektek közül a legnagyobbak (összesen 8,4 MW beépített teljesítménnyel) a következők (3. táblázat).

3. táblázat: Hazai szennyvízhő-hasznosítási projektek

Projekt helyszíne	Mozgatott szennyvízmennyiség	Szennyvíz átlag-hőmérséklet	Beépített teljesítmény	Üzemelés kezdete
MOM Kulturális Központ és Larus Rendezvényközpont	90 m ³ /óra (2 160 m ³ /nap)	15-17°C	1,0 MW	2011
Szegedi Tudományegyetem JATIK épület	136 m ³ /óra (3 264 m ³ /nap)	17°C	1,4 MW	2015
FCSM Kerepesi úti telephely és székház	140 m ³ /óra (3 360 m ³ /nap)	17°C	1,0 MW	2012
FCSM Ferencvárosi átemelő telep	240 m ³ /óra (5 760 m ³ /nap)	17°C	1,2 MW	2015
MH EK Honvédkórház	480 m ³ /óra (11 520 m ³ /nap)	17°C	3,8 MW	2014

Forrás: saját szerkesztés KISS (2016) alapján

A bemenő szennyvíz hőenergia hasznosításának körültekintő és átgondolt tervezésére hívja fel a figyelmet WONG (2014) és NEDOROST (2018), megemlítve, hogy a szennyvízhő telep előtti túlzott kivonása – az alacsony vízhőmérséklet okán – problémákat okozhat a tisztítás hatékonyságát tekintve, és ez egyben megnövekedett energiafelhasználással is járhat. Mindez alapvetően meghatározza a szennyvíz hőenergia-tartalmának kinyerését, megvalósíthatóságát.

A telepről kikerülő, állandóan áramló szennyvíz energiájának hasznosítására egy lehetőség a szennyvíz-turbinák alkalmazása, amely szintén jelentős potenciált rejt magában. A megtermelhető energia mennyisége azonban jelentősen függ az adott telep kialakításától és a földrajzi adottságoktól is (GAIUS-OBASEKI, 2010). Habár a kisméretű (5 kW – 100 kW kapacitású) hidroturbinák alkalmazásának megtérülési ideje a rendszerelemek hasznos élettartamán belül alakul, a jelentős többletköltség miatt csak a legkedvezőbb földrajzi adottságok, domborzati viszonyok mellett javasolható (TAMRAKAR, 2015).

2.6.2. Szennyvíziszap-rothasztás után kogeneráció vagy biometán-előállítás

MATTESON és JENKINS (2007) tanulmánya alapján az 50%-nál nagyobb nedvességtartalmú szerves anyagok - mint például a 95-99%-os nedvességtartalmú szennyvíziszap – kémiai energiatartalmának hasznosítására a leghatékonyabb módszer az anaerob rothasztás. Hozzá kell tenni, hogy a szennyvíz kémiai energiájának mintegy fele elvész a szerves anyagok aerob immobilizálásával, majd a fennmaradó energiatartalom fele a rothasztást követően az iszapban marad. További veszteségek merülnek fel a kapcsolódó energiatermelő technológiák energetikai hatásfokának megfelelően. BÁNYAI et al. (2009) és KÁRPÁTI (2002) alapján így a rothasztás során az iszap energiatartalmának kb. negyede nyerhető ki metánként. A rothasztás hatásfoka és gazdaságossága megfelelő előkezeléssel tovább növelhető (PÉREZ-ELVIRA et al., 2006; NEIS et al., 2008; NÉMETH és KÁRPÁTI, 2009; KÁRPÁTI, 2014). Megfelelő előkezelési eljárás alkalmazásával, ugyanakkor jelentős többletköltség befektetésével akár – a közeljövő egyik potenciális energiahordozójaként, hajtóanyagaként – hidrogén is előállítható a biogáz mellett, két külön reaktortér kialakításával (LEE – CHUNG, 2010; DE GIOANNIS et al., 2013; YANG – WANG, 2017).

A kémiai energiatartalom hasznosításának másik lehetősége az iszap égetése, a magas nedvességtartalomból adódó kedvezőtlen fűtőérték, illetve energetikai hatásfok miatt ennek alkalmazása viszont nem javasolható.

Az aerob lebontáshoz képest kedvezőbb alternatívát képvisel a megfelelően tervezett anaerob eljárás abból a szempontból is, hogy előbbinél a széntartalom jelentős része a kimenő CO₂-ben távozik a légkörbe, másik része pedig a szennyvíziszapban kerül lerakásra. Ettől eltérően anaerob lebontásnál a rothasztott iszap széntartalma mellett a széntartalom jelentős hányada a biogázba kerül, így lehetővé téve a hulladékból történő megújulóenergia-termelést. Az iszap égetése és a rothasztás egymást kölcsönösen kizáró műszaki megoldások. A rothasztás előnyeként jelölhető meg a víztelenítésben, illetve a szaghatás csökkentésében játszott szerepe is (KOCSIS, 2011).

A rothasztást követően a biogáz hasznosításának egyik lehetősége a gázmotorral történő villamosenergia-termelés (35-45%-os hatásfokkal) és hőenergia-termelés (KÁRPÁTI, 2018), vagy pedig hőenergia-termelés gázkazánnal. További hasznosítási alternatíva a keletkező biogáz tisztítása, majd a kinyert biometán földgáz-helyettesítési, vagy hajtóanyag célú felhasználása (BAI, 2007).

Az energiamérleg kedvező irányba mozdításának egyik lehetősége a biogáz-termelés fokozása külső segédanyagok vagy melléktermékek együtthrothasztásával (BATSTONE és VIRDIS,

2014; ASTALS et al., 2014; KIM et al., 2017; XIE et al., 2017). Ily módon többletenergia termelése is elérhető, együttrohasztás nélkül azonban jellemzően kb. a levegőztetés energiaigénye fedezhető, amely a tisztítás teljes energiaigényének a fele (KÁRPÁTI, 2018).

Bár a telepi energia-önellátás jóval gyakoribb célként jelenik meg, a fejlett EU-tagállamokban viszonylag elterjedt a biogáz tisztításával előállított biometán földgáz-hálózatba vezetése, illetve közlekedési célú hasznosítása (VENKATESH - ELM, 2013). Utóbbi egyes fejlődő országokban (Irán, Pakisztán, Argentína, India) is jelentős mértékűnek tekinthető. A biometán értékesítésének feltételei nem függenek a gázszolgáltatóktól, a helyi tömegközlekedésben történő felhasználáskor jelentkező károsanyagkibocsátás-csökkenés pedig éppen ott (a belvárosokban) jelentkezik, ahol a légszennyezés a legkomolyabb problémát jelenti (GABNAI - BAI, 2016). A hazánkban üzemelő biogáztelepek közül mindössze két helyen (Zalaegerszegen és Kaposváron) történik biometán-előállítás, ugyanis a hazai szennyvíztelepek túlnyomó része a saját technológiai hő- és villamos áram-igényének kielégítésére törekszik a biogáz hasznosítása során (HORÁNSZKY, 2012, GABNAI, 2017). A kogenerációs energiatermelés magas arányának egyik legfőbb oka a nyári időszakban keletkező hőenergia-hasznosítás problematikája (BAI, 2015).

A méret befolyásoló hatása

KÁRPÁTI (2017) alapján a biogáz-termelés alsó mérethatárának a 20 000 – 50 000 LEÉ (lakosegyenérték) kapacitás jelölhető meg. Ennek okai, hogy ezen mérethatár alatt relatíve kevés a szervesanyag-mennyiség, így nem gazdaságos a biogáz-termelés: a rohasztó, a gáztároló, a gázmotor, a kiépítendő automatika, a vezérlés és egyéb kiegészítő berendezések fajlagos beruházási költsége annál magasabb, minél kisebb a telep kapacitása (KÁRPÁTI, 2017). Ennek megfelelően elterjedt gyakorlat, hogy a kisebb települések, agglomerátumok telepeiről régiós szervezésben a nagyobb tisztító telepekre szállítják a keletkező iszapmennyiséget, ahol megtörténik az anaerob biogáz-termelés (KÁRPÁTI, 2018). A biogáz-termelés fokozásának a külső segédanyagok vagy melléktermékek együttrohasztása mellett másik lehetősége az előülepítő rendszerbe integrálása, ami egyrészt csökkenti a biológiai tisztítás térfogatigényét, másrészt pedig az előülepített iszapnak jóval nagyobb a fajlagos energiataralma (metántermelő potenciálja), mint a szekunder iszapnak. Előülepítő alkalmazását jellemzően a 20 000 m³/nap szennyvízmennyiség feletti telepeken célszerű megvalósítani (KÁRPÁTI, 2014).

2.6.3. Szennyvíziszapkomposzt-hasznosítás és tápanyag-gazdálkodás

A szennyvíziszap – elsősorban a nem élelmezési célú területeken – a műtrágyák egyfajta alternatívájaként is felfogható (NABEL et al., 2014). A szennyvíziszap kijuttatása, és megfelelő energianövények megválasztása által lehetőség nyílik az olyan területek művelésbe vételére, amelyek egyébként nem, vagy korlátozottan hasznosíthatók (PSZCZÓLKOWSKA et al., 2012). A szennyvíziszapot, mint alapanyagot tartalmazó termékek energianövény-termő területeken történő alkalmazására több nemzetközi és magyar példa ismert. Ezen növények között egyaránt megtalálhatók a fás szárú és a lágyszárú energianövények. LABRECQUE et al. (2003) alapján a szennyvíziszap – megfelelő mennyiségű talajba juttatás mellett – kedvező hatást gyakorol az energianövények hozamára. A növények a szennyvíziszapból jelentős mennyiségű nitrogén felvételére képesek, amely elősegíti a nagyobb hozam elérését (SIMON et al., 2000). SIPOS (2012) vizsgálatában a szennyvíziszap-komposzt energianádra való hatását vizsgálta. Megállapítása szerint az energianád 50 t/ha szennyvíziszap-komposzt kijuttatása mellett éri el a legnagyobb hektáronkénti szárazanyag-hozamot (65%-os össztömeg-növekedés), míg ennél kevesebb mennyiség alkalmazásával alacsonyabb hozam érhető el, magasabb dózisban (100 t/ha kijuttatott mennyiség mellett) viszont már növekedésgátló hatás jelentkezik (4%-os hozamcsökkenés) a kontroll, vagyis iszapkijuttatás nélküli parcellákhoz képest. A sida energianövény esetében a kijuttatandó mennyiség NABEL et al. (2014) kísérletei alapján hasonló nagyságrendű, 40 t/ha. Napjainkig számos kutatás igazolta a hígtrágya, a szennyvíz, a szennyvíziszap és annak utókezelésével előállított komposzt hozamnövelő hatását (HOLM és HEINSOO, 2013), valamint fűz és nyár energiaültetvényekben elért eredményeket (HEINSOO et al., 2008).

A szennyvíziszap komposztok szántóföldi felhasználásának egyik legkritikusabb pontja egyes nehézfémek jelenléte lehet, ami miatt az élelmiszer- és takarmánycélú termesztés esetén kerülni kell a közvetlen kijuttatást. Ugyanakkor energianövények esetében a komposzt kedvező hatásain túl a talaj tisztításában is közvetlen szerepe lehet: a fás szárú energianövények különösen nagy koncentrációban veszik fel a nehézfémeket (GYURICZA, 2014a). Ez alapján megfelelő megoldás lehet a magas nehézfém-tartalommal rendelkező szennyvíziszap energianövényekre történő kijuttatása, amely akár jelentős mértékben képes az egyéb tápanyagok mellett a nehézfém-tartalom csökkentésére is (KURUCZ et al., 2018). GYURICZA (2014b) alapján az 50 t/ha komposzt kijuttatása nem növelte káros mértékben a talajban mért nehézfémek koncentrációját, és a statisztikailag igazolható változás kétévenkénti kijuttatás esetén talajszennyezettségi határérték alatt tartható. Az ismertetett hazai, valamint nemzetközi kutatások alapján a nehézfémeket a rövid vágásfordulójú energianövény a levélzetben, a

szárban és a gyökérzetben is raktározza, ezáltal hozzájárul a nehézfém-szennyezés csökkentéséhez, és kellő módon képes a szennyvíziszap-komposzttal kihelyezett nehézfém-mennyiség felvételére (BAUM et al., 2009; DIMITRIOU et al., 2009). Ily módon egyrészt a növény csökkenti a talaj káros nehézfém-tartalmát, másrészt pedig a keletkező biomassza energetikai célból válik felhasználhatóvá. A felszíni komposztborítás továbbá lassan feltáródó tápanyagot szolgáltat a növényeknek, és mulcstréteggént viselkedve akadályozza a gyomok csírázását, valamint csökkenti az evaporációt (LAUREYSENS et al., 2004). GYURICZA (2014b) kutatásában igazolta, hogy a szennyvíziszap-komposzttal kezelt energiaültetvény-parcellákon kisebb nedvességveszteség érhető el, amely a növényeket segíti a szárazabb periódusok átvészelésében, valamint megőrzi vagy javítja a talaj kedvező fizikai, biológiai állapotát is.

A megfelelő hozam elérése, valamint az adott termőterület állapotának megőrzése érdekében a tápanyag-utánpótlás fontosságát emeli ki POSZA (2018). LIEBHARD (2009) és GYURICZA (2011a) eredményei alapján egy atrotonna (abszolút száraz tonna) faanyag betakarításával 0,75-5,50 kg nitrogén, 0,58-1,00 kg foszfor, 2,60-4,00 kg kálium, 5,00-5,50 kg kalcium, valamint 0,50-0,76 magnézium kerül kivonásra a területről.

A fás szárú energiaültetvényeken történő szennyvíziszapkomposzt-felhasználás fentiekben ismertett kedvező hatásaira tekintettel számításaimban ennek hasznosítását feltételezem.

2.6.4. Energiaültetvényes biomassza-termelés és hasznosítás

Az energiaültetvényes biomassza-termelés lehetőségei

A biomassza alapú energiatermelés jelentősége a klímavédelem szempontjából, hogy fosszilis energiahordozók kiváltására adnak lehetőséget, hozzájárulva a fenntartható energiagazdálkodáshoz. További előnyük, hogy rövid időn belül (akár 1-2 éven belül) újratermelődnek, és az így kiváltott fosszilis energiaforrások károsanyag-kibocsátása is megelőzhető (BAI et al., 2002). A fás szárú energiaültetvények klímaváltozással kapcsolatos lehetőségeiről, továbbá fitoremediációs, tájrehabilitációs célú alkalmazásának lehetőségeiről számos hazai és nemzetközi kutatási eredmény számol be (HELLER et al., 2003; MOLA-YUDEGO és ARONSSON, 2008 IN: BAKTI, 2017). A fás szárú energetikai ültetvények eredményesen termesztethők a belvizes, illetve ártéri területeken, valamint kifejezetten száraz, aszályos körülmények között is. Az erózióra vagy deflációra hajlamos területeken (hazánk szántóterületének kb. 60%-a) rövid vágásfordulójú ültetvények telepítésével kiváló talajvédő hatás érhető el a csaknem egész éves talajfedésnek köszönhetően (FARKAS et al., 2005), ezáltal létesítésük a vidéki népesség megőrzésén túl a gazdálkodók számára is jövedelmező

mezőgazdasági alternatíva lehet (GYURICZA, 2007). A remediációra szoruló területek megfelelő kezelésének, hasznosításának, valamint az egyre növekvő biomasszaigény kielégítésének alternatívái az agroerdészeti rendszerek, melyeknek egyik eleme lehet a fás szárú energetikai ültetvény. Ezen multifunkcionális rendszerek – megfelelő technológia alkalmazása mellett – kedvező gazdasági megtérülési mutatókkal rendelkeznek, emellett olyan fontos ökoszisztéma-szolgáltatásokat nyújtanak, mint a karbon-megkötés, a víz- és talajvédelem, illetve a biodiverzitás megőrzése. Az agroerdészeti technológiák alkalmazása számos ökológiai-környezetvédelmi pozitívum mellett hozzájárul a kedvezőtlen klimatikus hatások mérsékléséhez, elősegítve a mezőgazdasági termelés rugalmas alkalmazkodását (VITYI - MAROSVÖLGYI, 2014).

A magyarországi, energianövény-hozamokra vonatkozó szakirodalmi adatok alapján az alábbi hozam-intervallumok határozhatók meg a különböző fafajokra vonatkozóan (4. táblázat).

4. táblázat: A hazai energiaültetvényeken mért hozam-intervallumok

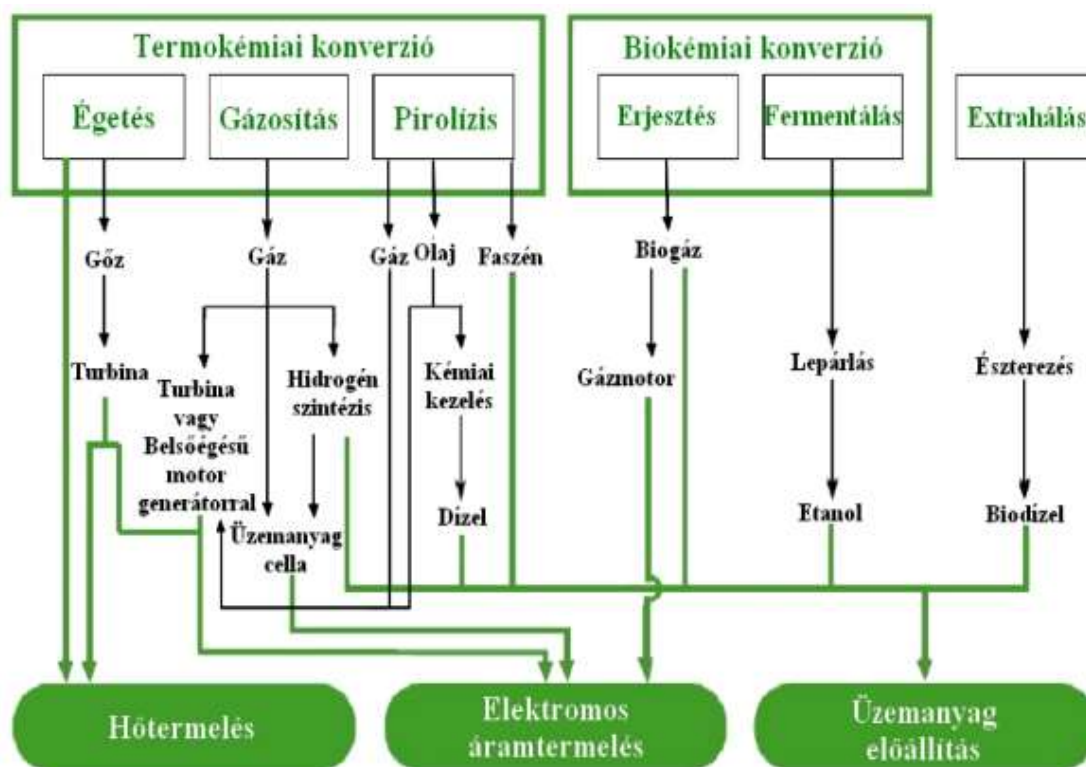
Fafaj:	Nyár	Fűz	Akác
Hozam (a.t./ha/év):	8,7-24,0	7,8-25,0	5,0-20,0
Források:	BAI et al. (2002); GRASSELLI et al. (2004) IN: GRASSELLI és SZENDREI (2006); BARKÓCZY et al. (2007) IN: POPP és POTORI (2011); DEFRA (2007); ERDŐS (2007); RÉNES (2008) IN: POPP és POTORI (2011); REKK (2009); NÉMETH (2011); GYURICZA (2011b); CSIPKÉS (2011); GABNAI (2011); MÁDAINÉ ÜVEGES (2012); PÓLISKA (2012); GYURICZA (2014a); KONDOR (2015); BAKTI (2017); POSZA (2018) és saját adatgyűjtés alapján		

Az energetikai célú ültetvények hazánkban mért átlagos hozama igen nagy szórást mutat (5-25 atrotonna/ha/év) a termőhely, a klíma, a fafaj és a termesztés-technológia függvényében. A hozam akkor mondható megfelelőnek, ha eléri az 8-10 atrotonna/ha/év értéket (IVELICS, 2006; BARKÓCZY - IVELICS, 2008).

A megtermelt faapríték felhasználása energiatermelésre

A különböző biomassza-féleségek, illetve melléktermékek és hulladékok energetikai célú hasznosítására számos lehetőség adódhat. A 4. ábrán látható konverzió-típusok közül közvetlenül vagy közvetve mindegyik kapcsolódhat a szennyvíztisztítási tevékenységhez. Ahogy korábban már említésre került, a keletkező szennyvíziszap bevált hasznosítási módja az erjesztés, míg a termokémiai konverzió típusai hatékonyan alkalmazhatók a szennyvíziszap-komposzt felhasználásával összekötött, energetikai ültetvényeken megtermelt faanyag, vagy

akár a tisztító tevékenység végén maradó iszapnak a hasznosítására, egyben ártalmatlanítására (mono- vagy együttégetés során).



4. ábra: A biomassza felhasználásának módjai a konverzió típusa szerint

Forrás: 17

BODNÁR (2016) alapján az alternatív termikus technológiák legnagyobb előnye a hagyományos égetéssel szemben, hogy a szilárd halmazállapotú hulladékot gáz halmazállapotú energiahordozóvá, ún. szintézisgázzá (pirolízisnél pirogázzá) alakítják át, amelyből nagyobb hatékonyságú technikai körfolyamatban termelhető hasznos hő- és villamos energia. Az így módon kapott gáztermék vegyipari szintézisekben (pl. metanolgyártás) is hasznosítható. A termokémiai konverzió típusai közül a szakirodalmak alapján jobb energetikai hatásfokkal rendelkezik a gázosítás és a pirolízis, habár más és más termékek és kihozatali mennyiségek jellemzik ezen technológiákat.

Az égetés, gázosítás és pirolízis technológiájával működő rendszerek sajátosságaira, a különböző termelési paraméterekből és típusokból adódó különbségekre, továbbá a világszinten működő (elsősorban kanadai, USA-beli, németországi, Egyesült Királyságban működő és spanyolországi) üzemekre, az előállított termékekre és azok önköltségére fókuszál publikációjában PATEL et al. (2016). A termékek között megjelenik a metanol, az etanol, a dimetil-éter, az etilén, a propilén, az ammónia, a bioolaj, a biokoks, és különféle

motorhajtóanyagok és alapanyagok, mint a Fischer-Tropsch szintetikus benzin, a hidrogén, a cseppfolyós petróleumgáz, a dízel és gázolaj különböző típusai.

A három technológia különbsége elsődlegesen a levegő (oxigéntartalmának) meglétéből vagy hiányából adódik (5. táblázat).

5. táblázat: A termokémiai konverzió technológiái

Technológia	Égetés	Pirolízis	Gázosítás
Oxigén jelenléte	Az égetés olyan exoterm folyamat, amelynél a tökéletes oxidáció, megfelelően nagy léghélesleggel biztosítható	A pirolízises eljárásnál a hőbontás levegő nélkül történik.	Az elgázosítás során részleges oxidáció történik kevés levegővel

Forrás: I7 és BASU (2013) alapján saját szerkesztés

A fentiek mellett különbség adódik még a jellemző hőmérsékletben, a technológia során felhasznált segédanyagokban és a főbb végtermékekben is. A három technológiáról elmondható, hogy előnyeiket és hátrányaikat alapvetően meghatározzák az elsődlegesen előállított termékek, illetve azok aránya.

A hagyományos égetés során hőenergia-termelés történik fűtés, technológiai hő vagy gőzturbinában való áramtermelés céljából. Az előállított termék felhasználási lehetőségei és a rendszer hatásfoka ugyanakkor gázosítás vagy pirolízis esetében kedvezőbb lehet. A gázosítás folyamata során termelt generátorgáz vagy szintézisgáz közvetlenül elégethető gázturbinában vagy gázmotoros rendszerekben. Ily módon villamos energia állítható elő, miközben a hulladék hő is hasznosítható (akár a telepi hőigény vagy egyéb rendszerem technológiai hőigényének fedezésére, akár a távfűtésben való felhasználásra is) (KNOWLES, 2011 és JIN et al., 2017).

A pirolízis elsődleges terméke a pirolízis-olaj, amely energiatermelési célra vagy üzemanyaggá történő finomításra is alkalmas (HANAOKA et al., 2005 és SZUHI, 2009). A gázosítási technológia, valamint a pirolízis alkalmazása során koks is keletkezik, amely alkalmazható tápanyag-utánpótlás céljából, az aktív szén alapanyagaként vagy energetikai célból is (ROOS, 2010). Ezen termék felhasználható még a vaskohászatban, a cementgyártásban vagy erőművi felhasználása is lehetséges (HILL - DOWEN, 2010).

Az ismertetett termokémiai folyamatoknál a jövőben egyre inkább a nagyobb hozzáadott értéket képviselő termékek irányában történő elmozdulás várható az alapvető energia-termelési célról (REA, 2013).

A gázosító műben, valamint pirolízis-reaktorban a biomasszák széles köre hasznosítható, illetve ártalmatlanítható, ezek között van az energiaültetvényekből származó faapríték és akár a szennyvíziszap, vagy ezek keveréke is.

2.6.5. Tisztított szennyvíz és füstgáz CO₂-tartalmának hasznosítása algás tavakban

A mikroalgák bioenergetikai célra történő felhasználását emeli ki tanulmányában TAN et al. (2015). A szerző megemlíti, hogy a fenntartható zöldenergia-források egyik komoly alternatívája lehet a mikroalgák energetikai célú hasznosítása, amelynek előnye, hogy relatíve kis területen nagyobb hozamokat lehet elérni, továbbá nem szükséges számára jó minőségű termőföld, és akár szennyvízre alapozva is természetű. Így hozzájárulhat az élelmiszer és energia konfliktus feloldásához. Az algafélék előnye elsődlegesen abból adódik, hogy a fotoszintetizáló organizmusok közül – fényhasznosítási hatékonyságát tekintve – kiemelkednek 5-7%-os hatásfokukkal, így meghaladják még a különböző intenzív szántóföldi növénykultúrákat, mint a C³-as (3,5%) és C⁴-es növényeket is (4,3%) (BLANKENSHIP et al., 2011; HARNOS, 2008). Vagyis a fotoszintetizáló szervezetek közül a mikroalgák képesek a legnagyobb hozam elérésére (SEKAR – RAMASAMY, 2015 IN: BAI et al., 2016).

A biogáz- és/vagy szilárd biomassza-alapú energiatermelésnél az égetés során keletkező füstgáz algás tavakba vezetése és mikroalgákkal való megkötése, hasznosítása ígéretes módja lehet a CO₂-kibocsátás csökkentésének, egyben a biomasszahozam fokozásának vagy az újabb generációs bioüzemanyag-előállításnak (ÖRDÖG, 2009). Tekintve, hogy az algák széntartalma a szárazanyaguk 36-65%-a (CHAE et al., 2006; SYDNEY et al., 2010 IN: VAN DEN HENDE et al., 2012), a kellő mennyiségű szén rendelkezésre állása kulcsfontosságú. A füstgáz CO₂-koncentrációja kb. 15-18% (KUŹNIA et al., 2015), amelyet nagy CO₂-tűrésű algákkal megfelelően lehet hasznosítani (BAI et al., 2012; ZHANG, 2015), ugyanakkor számos korlátozó tényező jelentkezik, amelyek meghatározzák a lehetőségeket. A füstgáz minőségét illetően különbség van az eltérő típusú erőművek között: a kogenerációs technológiával működő üzemek füstgáza (biogáz-hasznosítás elektromos- és hőenergia termelésre) csak részleges tisztítást tesz lehetővé, míg a biogáz biometánná tisztítása során kivont CO₂ gyakorlatilag 100%-ban tiszta formában állítható elő. Az algák rendszerbe illesztésének további előnye lehet, hogy ily módon a tisztított víz makroelem-tartalma is közvetlen módon

⁷ C³-as növények: a légköri szén-dioxidot Calvin-ciklusban kötik meg. Végterméke egy három szénatomos cukor. A csoportba tartoznak: mérsékelt- és hidegégövi növények, ill. a legtöbb gabona (pl. búza, árpa).

⁸ C⁴-es növények: a légköri szén-dioxidot a dikarbonsav-ciklus segítségével kötik meg. Végterméke egy négy szénatomos cukor. A csoportba tartoznak: többnyire trópusi eredetű növények (pl. cukornád, kukorica, cirok).

hasznosítható (BAI, 2011; POPP et al., 2016). Különböző tisztaságú lakossági szennyvízen történő algatermesztés esetében jelentős mértékű, 70-90% közötti tápanyagfelvételi arányt mértek kutatásaikban LAU et al. (1995), MARTINEZ et al. (2000), WANG et al. (2010) és CRAGGS et al. (2012). A különböző algafelhasználási változatok (pl. biogáz, biodízel, takarmányozás, eltüzelés) között a legnagyobb különbségek – a helyettesített termékektől függően – az alga értékében, valamint a biogázcélú hasznosításon kívül minden esetben szükséges szárítás mértékében és módjában jelentkeznek. A biogázüzemi visszatáplálás a többi alghasznosítási lehetőséghez képest a legkisebb tőke- és energiaigényű, külön marketingmunkát nem igénylő, piaci kockázatokkal nem terhelt lehetőség, egy környezeti szempontból kiváló, gyakorlatilag hulladék nélkül üzemelő alternatíva, amelynek azonban gazdasági eredményei – hasonlóan a többi, kifejezetten hulladékkezelési eljáráshoz – szerénynek mondhatók (BAI - GABNAI, 2014). Az előző hasznosítási módok mellett folyamatos a kutatási tevékenység az egyéb innovatív megoldások tekintetében. Erre példa a szennyvíz kétlépcsős biodegradációja, mely során biohidrogén-termelés történik a sötét-fermentáció (mikroorganizmusok), majd a ftoheterotróf degradáció (mikroalgák) szakaszaiban (BOBOESCU, 2014).

Megemlítendő ugyanakkor, hogy az algák intenzív termesztési technológiái jelentős mennyiségű elektromos energiát igényelnek (a CO₂-betáplálás és levegőztetés, keverés, fűtés stb. miatt) a hatékony és produktív működés fenntartásának érdekében, melynek megújulóenergia-alapú biztosítása javasolható.

2.6.6. Napelemes energiatermelés

A napenergia-alapú energiatermelés jelentős mértékben hozzájárulhat a fenntartható energiagazdálkodás elősegítéséhez. A naplemek életciklusából kiindulva a gyártás energia- és anyagigényét követően sok éven keresztül CO₂- és egyéb károsanyag-kibocsátás, valamint hulladék keletkezése nélkül állít elő zöld energiát (HOSENUZZAMAN et al., 2015 és AMAN et al., 2015). Nagy előnye, hogy decentralizált energiatermelést tesz lehetővé a Föld bármely pontján. A fotovoltaikus energia-előállítás napjainkban fontos szerepet játszik a világ energiatermelésében (TYAGI et al., 2013). A napelemes technológia fajlagos beruházási költsége az utóbbi évtizedben jelentős mértékben csökkent, további csökkenés a technológiára, vagy új alapanyagokra irányuló kutatás-fejlesztési áttörések következtében várható elsődlegesen (ZSIBORÁCS et al., 2016). E komoly lehetőségeket rejtő energiaforrás hatékony módon alkalmazható a szennyvíztisztító telepek részleges vagy akár teljes villamosáram-önellátására is. A biomassza-alapú energiatermelés egyik jelentős előnyeként megemlítendő, hogy míg a napenergiát hasznosító berendezések éves teljesítmény-kihasználtsága – a termelést

befolyásoló tényezők (pl.: időjárás, nappal-éjszaka váltakozása stb.) – miatt jellemzően 10-15%, addig a biomassza tüzelőanyagú erőművek teljesítmény-kihasználása 75-95% (GERGELY, 2012). Egy másik jellemző probléma lehet az energiátárolás kérdése: míg a napenergiával történő energiatermelés nem irányítható, addig a biomassza-alapú energiatermelés tervezhető és szabályozható. A napelemes energiatermelés ugyanakkor fontos szerelem lehet más kiegészítő technológiák (pl. algás rendszer) megnövekedett energiaigényének fedezése céljából.

2.7. Nemzetközi jó gyakorlatok

A szennyvíztelepek modernizálásával, a megfelelő módon kialakított anaerob technológiával (JENICEK et al., 2013; SHOENER et al., 2014) és egyéb energiatermelő eljárások rendszerbe iktatásával a telepek fejlesztői, üzemeltetői komoly lépéseket tesznek az energia-önellátás elérése érdekében (REMY et al., 2014; GUDE, 2015; GIKAS, 2017). Világszinten több példa is felhozható az energiaigény részleges vagy teljes kiváltására. SHEN et al. (2015) kutatásában Európában és Észak-Amerikában összesen 12 db szennyvíztelepet említ, ahol 90%-ot meghaladó mértékű energia-önellátás valósul meg. Észak-Amerikában az East Bay Municipal Utility District (EBMUD) szennyvíztelep (265 ezer m³ napi kapacitással) volt az első energia-semleges telep: a gázmotorok modernizálásával a telep a teljes energiafelhasználás 126%-át képes megtermelni. Energetikai önellátást valósított meg két osztrák telep is: a Strass-i és Wolfgang See-Ischl-i tisztítómű, ahol korszerűsítések elvégzésével (pl. a DEMON eljárás bevezetésével) elérték a 100%-os energia-önellátást és a keletkező többletenergia hálózatba juttatását (NOWAK et al., 2015). A tisztított szennyvíz energiaültetvényes hasznosítására példa Enköping (Svédország), ahol egy fitoremediációs-bioenergetikai projekt keretében 75 ha rövid vágásfordulójú Salix fűz ültetvényre történik a 200.000 m³ tisztított szennyvíz kiöntözése. Ennek eredményeként – a szennyvíz N és P tartalmát hasznosítva – jelentősen csökkenthetők a műtrágya-költségek, továbbá 50%-ot meghaladó mértékű biomassza-hozamnövekedés figyelhető meg.

A körforgásos gazdaság és a szennyvíz-gazdálkodás kapcsolódására kiváló példa a szintén svéd Hammarby Sjöstad projekt (Stockholm), melynek keretében kommunális szennyvízre alapozott integrált zártkörű hulladék-víz-energia rendszert valósítottak meg. A terület egészen 1998-ig iparterület volt, ahol jelentős mennyiségű olaj, nehézfém és egyéb szennyeződés halmozódott fel korábban. Ennek megfelelően a városrész kialakítását a terület megtisztításával kellett kezdeni. A tervezők célja volt, hogy a földhasználat, közösségi közlekedés, építkezés, energetika, valamint víz- és hulladékgazdálkodás környezettudatos és modern megtervezésével, és a körfolyamatok maximalizálásával felére csökkentsék a

környezetterhelést, ily módon elinduljanak a környezeti és gazdasági fenntarthatóság irányába (FRÄNNE, 2007).

Egy energetikai szempontból ígéretes innovatív, a hagyományos eleveniszapos technológia továbbfejlesztésére alkalmazható eljárásaként említhető meg a CARISMO (CARbon IS MOney) kutatási projekt keretében elvégzett átalakítás. Az új szennyvíztisztítási technika célja a szennyvíz teljes energiataralmának felhasználása és lényege, hogy egy innovatív szűrési eljárással az energiában gazdag szerves anyagokat már a tisztítóba való beömléskor elvonják a szennyvízből, majd azt közvetlenül az iszaprohasztóba vezetik. Így kiküszöbölik az iszap „elevenen tartásának” energiaigényét, egyben biogázt termelnek a jelentős mennyiségű primer iszapból. Az eredmények alapján a CARISMO akár jelentős mértékben hozzájárulhat a fenntarthatósági és klímavédelmi törekvésekhez, ugyanis az üzemelési költségek és a tisztítási tevékenység korábbihoz hasonló, megfelelő szinten tartása mellett jelentős mennyiségű (a hagyományos rendszernél 80%-kal több) energia termelhető. Ezzel párhuzamosan a kutatási beszámolók szerint a tisztítás áramfelhasználása 50%-kal csökkent. Fontos hozzátenni, hogy a kifejlesztett technológia alkalmazása speciális vegyszer felhasználását igényli. Habár ennek előállítási energiaigénye negatív irányban hat az energiamérlegre, ugyanakkor az még mindig pozitív marad (WEIGERT, 2015).

2.8. Energiafelhasználás a szennyvíztisztításban

A kommunális szennyvíz tisztítása jelentős mennyiségű energiát igényel, döntően az eleveniszap mikroorganizmusainak levegőztetése – és az ehhez szükséges szivattyúk üzemeltetése – miatt (KÁRPÁTI, 2014). Így a tisztítótelepek a települések legnagyobb egyedi áramfogyasztói közé tartoznak: bizonyos esetekben akár a város teljes áramfogyasztásának a 20%-áért is felelősek lehetnek (WEIGERT, 2015). A kezeletlen szennyvíz viszont – ahogy korábban is említésre került – jelentős energiát hordoz magában: a benne lévő szerves anyagok annyi energiát tartalmaznak, amivel a hagyományos tisztítási folyamat teljes energiaigénye fedezhető lehet (KALAVROUZIOS, 2017).

A tisztítás céljából felhasznált villamos energia tekintetében – mint a működési költségeket leginkább befolyásoló költségcsoport – igen nagy eltérések lehetnek a különböző tisztítótelepek esetében. Az ENERWATER projekt (2017) keretében vizsgált 369 db különböző technológiájú tisztítótelepen végzett felmérés alapján elmondható, hogy a relatíve kisebb telepeknél kevésbé hatékony (akár 5,50 kWh/m³), míg a nagyobb telepeknél igen hatékony (akár 0,13 kWh/m³) a tisztítás. Ezt tükrözi a fajlagos energiafelhasználásban észlelhető jelentős eltérés. MALIN (2007) leírja, hogy a szennyvíztelepeken a felhasznált anyagokat és alkatrészeket érintő

technológiai fejlődésből kifolyólag folyamatosan lehetőség van a fajlagos energiafelhasználás javítására a folyamatok, berendezések és alkatrészek (levegőztetés, szivattyúk, keverők stb.) cseréjével, modernizálásával, a rendelkezésre álló tőke függvényében. Éppen ezért Európa- és világszinten is óriási különbségek alakultak ki a telepek energetikai hatékonyságának vonatkozásában. DULOVICS (2012) alapján a szennyvíztisztító telepen az energia-megtakarítás legnagyobb részét (~70%-át) a biológiai tisztítás és az iszapkezelés területén lehet elérni. További megtakarítást (kb. 20%-ot) lehet elérni a mechanikai tisztítási lépcsőnél és az épületeknél, míg az energiaellátási szerződések optimalizálásával közel 10%-os megtakarítás érhető el (GARAI, 2005).

Kutatómunkámban azonban a tisztítótelepi berendezések modernizálásából adódó költségmegtakarítási lehetőségek helyett az alaptechnológiát kiegészítő energetikai és tápanyag-gazdálkodási alternatívák lehetséges hatásait és megvalósíthatóságát vizsgálom a magyarországi adottságokat és városi tisztítótelepi energiaigényeket alapul véve.

2.9. A szennyvíztisztítás jogszabályi háttere, előírások és irányelvek

A tisztító telepeknek Magyarországon a fenntartható vízgazdálkodás, és a természeti környezet állapot-megőrzése és fenntartása érdekében komoly hazai és nemzetközi előírásoknak, jogszabályoknak, irányelveknek kell megfelelniük. Dolgozatom jelen pontjában a különböző méretű telepek esetében aktuális kibocsátási határértékekre vonatkozó legfontosabb jogszabály (28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet) előírásait, valamint a szennyvíziszap-komposzt kihelyezése szempontjából irányadó jogszabályi előírást mutatom be. A szennyvízgazdálkodáshoz kapcsolódó egyéb releváns előírásokat és jogszabályokat az I. számú melléklet tartalmazza.

28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet a vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk egyes szabályairól

A technológiai határértékek meghatározásánál a kiépített terhelési kapacitás (lakosegyenérték), valamint a nitrogén esetében az adott időszak a mérvadó. A kapacitás függvényében elmondható, hogy minél nagyobb a telep kapacitása, annál szigorúbbak az előírások (6. táblázat). Ennek elsődleges oka, hogy a kisebb kapacitású telepeken – összefüggésben a méretgazdaságosság elvével – az esetek nagy részében nem, vagy csak irreális beruházási, működési költségekkel lenne elérhető a legszigorúbb kibocsátási határértékek betartása.

6. táblázat: A települések szennyvíztisztítására vonatkozó technológiai határértékek

Képzett terhelési kapacitás (LEÉ)	KOI _k (mg/l)	BOI ₅ (mg/l)	Összes lebegő SS (mg/l)	Összes-P (TP) (mg/l)	Összes nitrogén (TN) (mg/l)	
					VI-XI.15	XI.16-IV.30
< 600	300	80	100	_(1)	_(1)	_(1)
601-2000	200	50	75	_(1)	_(1)	_(1)
2 001-10 000	125	25	35	_(1)	_(1)	_(1)
10 001-100 000	125	25	35	2 ⁽²⁾	15 ⁽²⁾	25 ⁽²⁾
> 100 000	125	25	35	1 ⁽²⁾	10 ⁽²⁾	20 ⁽²⁾

⁽¹⁾ A hatóság vízvédelmi érdekek alapján egyedi határértéket állapíthat meg

⁽²⁾ A határértékeket a 240/2000. (XII.25.) Korm. rendelet szerinti érzékeny területen (pl: Balaton vízgyűjtője), valamint a 49/2001. (IV.3.) Korm. rendelet szerinti nitrát érzékeny területeken 10 ezer LEÉ felett kell betartani.

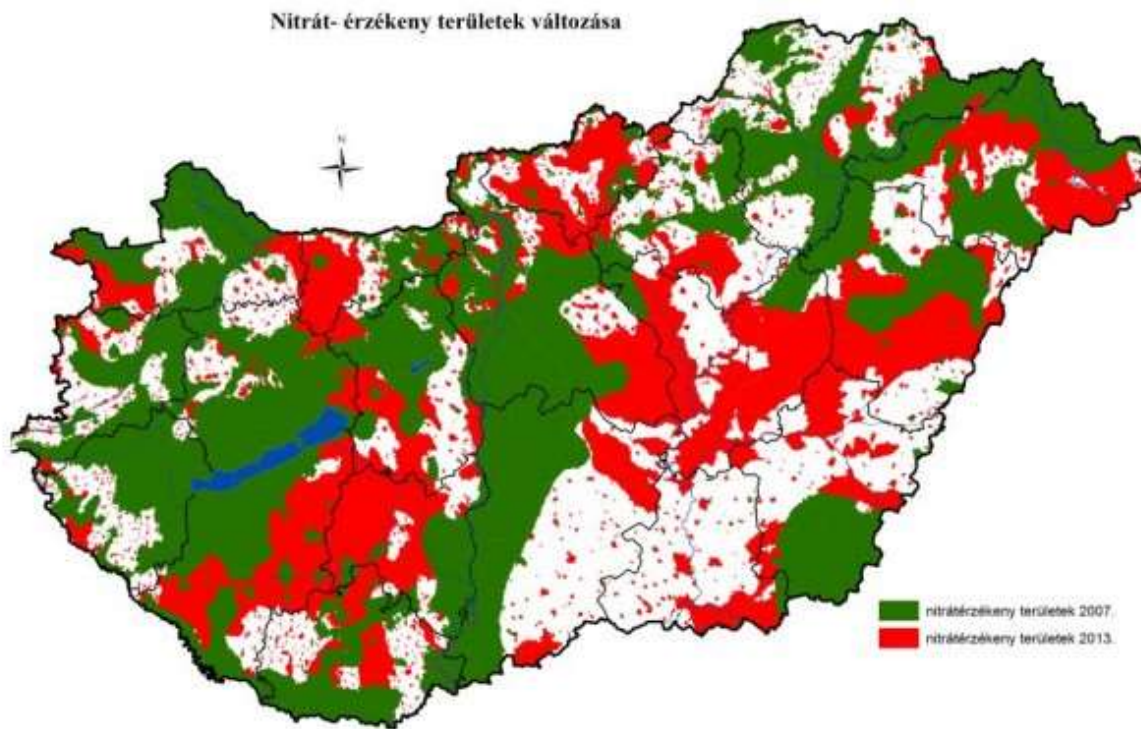
50/2001. (IV. 3.) Korm. rendelet (és az azt módosító 40/2008 (II.26.) Korm. rendelet) a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól

A kedvező lehetőségeket magában foglaló szennyvíziszap-komposzt felhasználásának tervezése során mindenképpen szükséges figyelembe venni a jogszabály 14. § (1) és (2) pontját, melyek a kihelyezhető mennyiségekre vonatkoznak:

14. § (1) „A mezőgazdasági területre évente, hektáronként kijuttatható mérgező (toxikus) elemek és káros anyagok mennyisége nem haladhatja meg a rendelet 6. számú mellékletében meghatározott értékeket, illetve szennyvíziszap-komposzt esetében a mellékletben foglalt értékek betartása mellett a kijuttatható szennyvíziszap-komposzt mennyisége nem haladhatja meg a 10 t szárazanyag/ha/év adagot.”

(2) „A külön jogszabály alapján nitrátérzékenynek minősülő mezőgazdasági területre a szennyvízzel, szennyvíziszappal, illetve szennyvíziszap-komposzttal kijuttatott összes nitrogén mennyisége nem haladhatja meg évente a 170 kg/ha értéket.”

Mivel az ország területének kb. 70%-a nitrátérzékenynek minősül (5. ábra; az érintett blokkok listáját a 43/2007. (VI. 1.) FVM rendelet tartalmazza), így kalkulációimban is ezt az értéket vettem alapul, figyelembe véve a maximum 10 t szárazanyag/ha/év kihelyezhető mennyiséget is.



Forrás: Földművelésügyi Minisztérium Agrárpolitikai és Fejlesztési Államtitkárság, 2013. október.

5. ábra: Nitrát-érzékeny területek Magyarországon

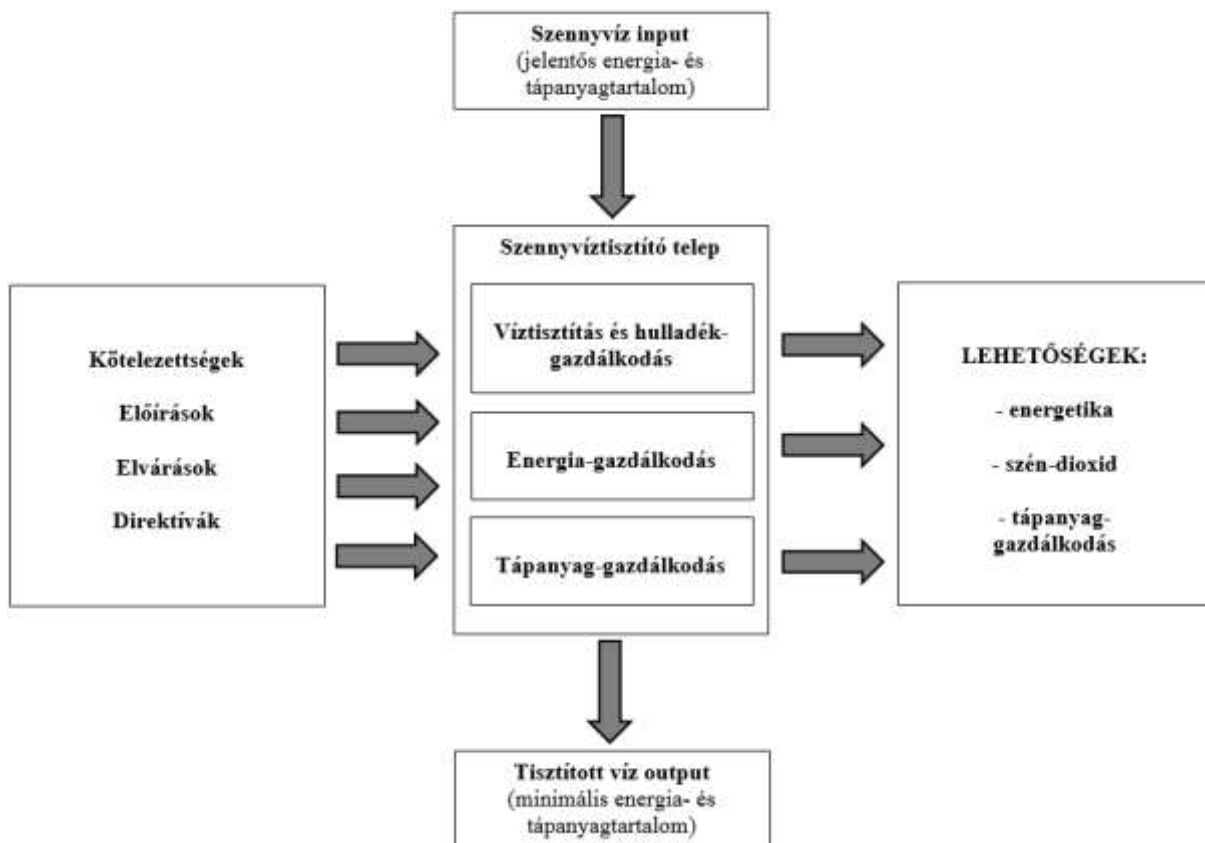
Forrás: 18

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Kutatómunkámat szekunder adatgyűjtéssel, a releváns hazai és nemzetközi szakirodalmak áttekintésével és feldolgozásával kezdtem, kitérve a szennyvíztisztítási tevékenység jellemzőire és sajátosságaira, fejlődési irányaira. Ennek során kiemelt figyelmet szenteltem a tevékenység körforgásos gazdasághoz és fenntarthatósághoz való kapcsolódására. Mivel az energia, tápanyag és károsanyag-kibocsátás „hármás” szervesen kapcsolódik az általam vizsgált területhez, így az ezekre vonatkozó törekvéseket és célkitűzéseket tágabb (globális, EU-s és magyarországi) és szűkebb (tisztító telepekhez közvetlenül kapcsolódó) értelemben is áttekintettem, összefoglaltam.

Ezt követően – primer adatgyűjtés keretében a különböző típusú és méretű tisztítótelepeken tett látogatásaimat, valamint a témakör szakértőivel való személyes konzultációimat követően – azonosítottam a tisztítótelepek méretéből adódó, illetve alaptechnológiájához kapcsolható telepi, valamint „telepen kívüli” lehetőségeket az energia/tápanyag/károsanyag témakörök vonatkozásában. A technológiák közül egyértelműen a hagyományos eleveniszapos rendszerhez kapcsolható a legtöbb kiegészítő alternatíva, elsődlegesen annak nagyobb tisztítási kapacitásából kifolyólag.

Ahogy az a 6. ábrán látható, a szennyvíztelepek működésébe a szennyvíz megtisztításán kívül sok egyéb (kiegészítő) tevékenység is integrálható.



6. ábra: A szennyvíztisztítási tevékenység alapfunkciója és kiegészítő lehetőségei

Forrás: saját szerkesztés

Kutatómunkám során kalkulációimat egységméretre, átlagértékek (átlagos hazai input, output és egyéb technológiai fajlagosok) figyelembe vételével végeztem, ugyanakkor munkám során azonosítottam a legfontosabb – méretből adódó – módosító és befolyásoló tényezőket mind az alaptermőtechnológiára, mind a lehetséges kiegészítő technológiákra vonatkozóan.

Az egységméretet 100 000 LEÉ (lakosegyenérték) méretben határoztam meg. Az említett méret meghatározásának okai:

- hazánkban a hasonló (100 000 LEÉ és attól nagyobb) kapacitású telepek felelősek a keletkező szennyvíz döntő hányadának tisztításáért,
- méretükből kifolyólag gazdaságosan megvalósítható a szennyvíziszap-rothasztás (KÁRPÁTI, 2016)

Vizsgálatomat átlagos szennyvíztelepi input, output és egyéb technológiai fajlagosokat alapul véve végeztem el, annak érdekében, hogy egységtelepre, valamint országos szintre vetített becsléseket tudjak adni az egyes alternatívák lehetséges hatásaira, eredményeire vonatkozóan, a telepméretből adódó legfontosabb módosító hatások beépítésével.

3.1. A számítások menete

Számításaim menetét az egyes vizsgált részterületeken a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra: A számítások menete

Forrás: saját szerkesztés

Munkám során egy teljes technológiai körfolyamatot összeállítva becsléseket végeztem az egyes alap- és kiegészítő technológiák energia-, tápanyag- és CO₂-gazdálkodásban betöltött lehetséges szerepére, valamint elvégeztem egyes kiegészítő technológiák gazdasági elemzését. A gazdaságosság megvizsgálásán keresztül céлом volt számszerűsíteni a kiegészítő technológiák gazdasági fenntarthatósághoz való hozzájárulását. Fontos megemlíteni, hogy – habár a szennyvíztelepek és csatornarendszer a közjavak csoportjába tartoznak – az általam elvégzett, kiegészítő szennyvíztelepi technológiákra vonatkozó elemzésben az externális hatások, a vízszennyezés megelőzése által elkerült negatív externáliák értékének számszerűsítésétől – a kapcsolódó módszertanok becslési bizonytalanságainak ismeretében – eltekintettem.

A CO₂-kibocsátás esetében a közvetlen kibocsátások számszerűsítésére szorítkoztam.

A technológiákra jellemző fajlagos adatokat egy Excel alapú, determinisztikus modellben összegeztem. A modell alkalmas az alaptechnológia és az azon alapuló kiegészítő (technológiai) lehetőségek költség-haszon, valamint gazdaságossági elemzésének komplex értékelésére, figyelembe véve az input- és output tényezők alakulásait.

3.2. Az alkalmazott módszerek

Doktori kutatómunkámban az alábbi módszereket alkalmaztam (7. táblázat):

7. táblázat: Az alkalmazott módszerek összefoglalása

Módszer	Részterület, cél
Költség-haszon elemzés	A biogáz-felhasználás költség-haszon elemzése
	A kiegészítő technológiák költség-haszon elemzése
Komparatív analízis	Egyes kiegészítő technológiák egymással történő összehasonlítása az elvégzett gazdaságossági elemzésre alapozva
Beruházás-gazdaságossági elemzés	Egyes kiegészítő technológiák beruházás-gazdaságossági elemzése
Érzékenységvizsgálat	A legfontosabb input- és outputtényezők, egységárak, valamint önköltségek gazdaságosságot módosító hatásának számszerűsítése
Küszöbérték-vizsgálat	A legfontosabb input- és outputtényezők, egységárak, valamint önköltségek minimumértékének meghatározása a gazdaságosság függvényében
Potenciál-becslés	Az egyes alap- és kiegészítő technológiák lehetséges szerepe az energia-, tápanyag- és CO ₂ -gazdálkodásban egységméretre vetítve, valamint országos szinten

Forrás: saját szerkesztés

A különböző tényezők változásából eredő bizonytalanságot HELFERT (2001) és NÁBRÁDI – SZŐLLŐSI (2007) alapján érzékenység-vizsgálatokkal szükséges kezelni, így célszerű meghatározni a változásoknak az eredményre gyakorolt hatását. A beruházás-gazdaságossági elemzés során a következő mutatókat határoztam meg (8. táblázat):

8. táblázat: Az alkalmazott dinamikus beruházás-gazdaságossági mutatók

Mutató megnevezése	Jele	Számítás módja/képlete	Értelmezése
Nettó jelenérték (Net Present Value)	NPV	$-C_0 + \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$	A jövőbeli jövedelmek jelenértékének és a beruházási költségnek a különbsége
Jövedelmezőségi index (Profitability Index)	PI	$\frac{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{C_0}$	A jövőbeli jövedelmek és a beruházási költség hányadosa
Diszkontált megtérülési idő (Discounted Payback Period)	DPP	$\sum \frac{C_t}{(1+r)^t} = C_0$	A beruházási költség megtérülésének időpontja (év)
Belső megtérülési ráta (Internal Rate Of Return)	IRR	$-C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+IRR)^t} = 0$	Az a kamatláb, amely mellett a NPV értéke „0”.

Jelölések: C_0 = beruházási költség; C_t = hozamok; r = kamatláb; t = évek száma

Forrás: saját szerkesztés GITTINGER, 1982; BAI, 2005; PÁLINKÓ-SZABÓ, 2008; NÉMETH, 2011 alapján

3.3. A felhasznált alapadatok, fajlagosok

3.3.1. A bemenő szennyvíz és a tisztított víz tápanyag-tartalma

Bemenő szennyvíz

- Lakosság által termelt szennyvíz: 130 liter/fő/nap
- KOI: 110 g/fő/nap (~ 850 mg/l)
- BOI₅: 60 g/fő/nap (~ 460 mg/l)
- TKN: 13 g/fő/nap (~ 100 mg/l) (redukált nitrogén – összes Kjeldahl Nitrogén)
(az ammónium-N és a szerves-N összege)
- TP: 2 g/fő/nap (~ 15 mg/l) (összes foszfor)
- Szárazanyag-tartalom: 1%

Tisztított víz

- TKN: 15 mg/l
- TP: 1 mg/l

Forrás: THURY (2009); KÁRPÁTI (2011); KÁRPÁTI (2014)

3.3.2. Szennyvíztelepi biogáztermelés és -felhasználás

Kogenerációs energiatermelés biogázból

- Biogázmotor (CHP) összehatófoka: 85% (HAKAWATI et al., 2017; VAN FOREEST, 2012; MERGNER et al., 2013 IN: NAGY et al., 2018)
 - Villamosáram-termelés hatásfoka: 40%
 - Hőenergia-termelés hatásfoka: 45%
- Telepi fajlagos villamosenergia-termelés: 0,372 kWh/m³ szennyvíz (BÁNYAI et al., 2014a)
- Telepi fajlagos hőenergia-termelés 0,419 kWh/m³ szennyvíz
- Telepi hőenergia-igény a bemenő vízmennyiség (m³/nap) függvényében: összes energiafelhasználás átlagosan 40%-a (BÁNYAI et al., 2014b)
- CHP egység fajlagos beruházási költsége önmagában: ~ 520 ezer Ft/kW_{el} (TOPIĆ et al., 2010; WORLD BANK, 2015 és EPA, 2017 alapján jelenlegi árra meghatározva)

Biogáz tisztítása és biometán-értékesítés vagy -felhasználás

- Biogáz CH₄-tartalma: 65% (TYAGI – LO, 2016)
- Tisztítás hatásfokai: 2% metánvesztés, 96% metánkinyerési hatásfok
- Biometán fűtőértéke: 34 MJ/Nm³
- Földgáz (bruttó, nem háztartási fogyasztói) értékesítési ára: 2,70 Ft/MJ (0,0078 EUR/MJ) (EUROSTAT, 2018b)
- CNG⁹/CBM¹⁰ sűrűsége: 0,78 kg/Nm³ (I9, I10)
- Bio-CNG ára (bruttó): 352,8 Ft/kg (1,18 EUR/kg) (CNG EUROPE, 2019)
- Biogáztisztító és -töltőállomás beruházási költségének számítása: a Biomethane Calculator (IEE Projekt Biometán Régiók által kifejlesztett szoftver) alapján (I11)
- Önköltségek, saját számítás alapján:

⁹ CNG: sűrített földgáz (Compressed Natural Gas)

¹⁰ CBG: sűrített biogáz (Compressed Biogas)

- Biogáz: 66 Ft/m³
- Biometán: 110 Ft/m³ töltőberendezés nélkül, ill. 126 Ft/m³ töltőberendezés nélkül

3.3.3. *Fermentált iszap komposztálása és hasznosítása energiaültetvényen*

- Komposzt TKN: sz.a. 2,1%-a (KÁRPÁTI, 2014)
- Komposzt TP: sz.a. 1%-a (KÁRPÁTI, 2014)
- Rothasztott iszaphozam: 0,35 kg iszap sz.a./m³ szennyvíz (THURY, 2009 és saját adatgyűjtés)
- Komposztálási technológia számításai: KÁRPÁTI (2014) alapján, 1:2 iszap: stuktúrányag térfogataránnyal számolva

3.3.4. *Energiaültetvényen történő komposzt-hasznosítás és faapríték-termelés*

- Kétévente kiszórt komposzt mennyiség és N-hatóanyag: 16 tonna és 168 kg N (figyelembe véve az 50/2001. (IV. 3.) Kormányrendeletben foglaltakat, amely alapján nitrátérzékenynek minősülő mezőgazdasági területre a szennyvízzel, szennyvíziszappal, illetve szennyvíziszap komposzttal kijuttatott összes nitrogén mennyisége nem haladhatja meg évente a 170 kg/ha értéket. Az ország területének kb. 70%-a minősül nitrátérzékenynek (18).
- Nitrogén hatóanyag értéke (bruttó): ~ 216 ezer Ft/t (KSH, 2019a)
- Foszfor hatóanyag értéke (bruttó): ~ 339 ezer Ft/t (KSH, 2019a)
- Faapríték beszerzési ára (bruttó): 20 000 Ft/atrotonna (POSZA, 2018) alapján
- Szállítás egységára (bruttó, tonnakilométer): alapesetben 105 Ft/tkm (GOCKLER, 2016)
- Prizmás tárolás területigénye: meghatározva a csonkagúla térfogatképlete alapján:

$$V = \frac{m}{3} \times (T + \sqrt{Tt} + t)$$

ahol: V = test térfogata, m = test magassága, T = eredeti teljes test alapterülete, t = hozzá hasonló levágott (felső) test alapterülete

Komposzt belső elszámoló árának meghatározása:

- Komposzt (bruttó) önköltségi ára (12 000 Ft/t sz.a.) - Hulladéklerakási járulék (6 000 Ft/t.sz.a.) = Komposzt belső elszámoló ára (6 000 Ft/t sz.a.) (MÉSZÁROS, 2016)

és MARKÓ, 2018). Az önköltségi ár tartalmazza a komposzt tárolásának, előállításának költségeit.

3.3.5. Megtermelt biomassza felhasználása gázosító/pirolízis erőműben és CHP-ben, majd energia-önellátás és a többletenergia értékesítése

Az energetikai ültetvényen megtermelhető faaprítékra alapozott technológia anyagáramait és gazdaságosságát részletesen a gázosításra (és hozzá kapcsolt kogenerációs erőműre) mutatom be, szót ejtve a pirolízisben rejlő lehetőségekről is. Mivel hazánkban hiányos a biomasszára (ezen belül fásszárú ültetvényekre) alapozott faelgázosítóhoz, illetve pirolizáló egységhez kapcsolt kogenerációs erőműre vonatkozó szakirodalom, így külföldi források felhasználásával határoztam meg azok főbb üzemelési paramétereit és fajlagosait, adaptálva a magyar helyzetre (UCHMAN, 2017 és SKOREK-OSIKOWSKA et al., 2014). A rendszer beruházási és működési költsége tartalmaz minden szükséges rendszerelemet, beleértve az aprítéktároló, valamint -manipuláció költségeit is.

A figyelembe vett fajlagosok, tényezők (UCHMAN, 2017):

- Rendszer hasznos élettartama: 15 év
- Gázmotor összhatófoka: 94%
 - Gázmotor villamos hatófoka: 37%
 - Gázmotor hőtermelési hatófoka: 57%
- Rendszer összhatófoka: 75%
- Villamos áram önfogyasztás: 10%
- Gázosító berendezés és gázmotor üzemelési idő: 8 000 üzemóra/év
- Gázosító berendezés és kogenerációs egység fajlagos beruházási költsége rendszerszinten: 833 ezer Ft/kW_{el}
- Gázosító és kogenerációs egység működési költsége (UCHMAN, 2017 és saját számítások alapján)
 - CHP működési költség: beruházási érték 1%-a évente
 - Karbantartás: beruházási költség 2%-a évente
 - Dolgozói létszám:
 - kisebb (131 kW_{el}) rendszernél: 4 fő

- nagyobb (357 kW_{el}) rendszernél: 8 fő
- Személyi jellegű ráfordítások: 4 000 000 Ft/fő/év
(nettó átlagbér + járulékai alapján)
- Vásárolt faapríték egységára (vill. önellátáshoz): 20 000 Ft/a.t.
- Felhasznált biomassza ára (önköltségen): 16 380 Ft/a.t.

3.3.6. Napelemes energiatermelés és szennyvíztelepi alkalmazhatósága

- Feltételezett fajlagos villamosáram-termelés (kWh/év): 1 200 (BAI et al., 2016; I12)
- Fajlagos beruházási költség és inverter ár: saját adatgyűjtés (I13-I19) alapján saját számítású képlettel meghatározva
 - ez alapján a beruházási költségfüggvény:

$$y = - 23,51 x^2 + 330 368 x + 1 000 000$$

ahol: y = a rendszer beruházási költsége (Ft), x = a rendszer beépített teljesítménye (kW_{el})

- Karbantartás napelemes rendszereknél: 4 000 Ft/kW/év (I15, I19)
- Inverter csere szükségessége: 15 év (I19)
- Rendszer hasznos élettartama (kivéve inverter): 30 év (BHANDARI et al., 2015)
- Hozammódosító tényező: 0,5%/év csökkenés a termelékenységben (SHARMA és CHANDEL, 2013).

3.3.7. Tisztított víz és keletkező füstgáz felhasználása algás tavakban

A kapcsolódó kalkulációt a szennyvíztelepi biogáz-hasznosítás során keletkező CO₂-mennyiség, biodízel-termelésre alkalmas algás hasznosítását felvételezve, BAI et al. (2017) cikkében szereplő számítások mintájára végeztem el, aktualizálva a CO₂-kvóta értékét, valamint a biodízel árát:

- CO₂-kvóta értéke: 22 EUR/t (EEX, 2019)
- Biodízel ára: 1,20 EUR/l (AGROINFORM, 2019)
- Kogenerációs energiatermelés során adódó CO₂-emisszió (65%-os metántartalom és 34 MJ/m³ metán fűtőérték alapján) 6,14 kWh/m³ biogáz fűtőértékkel és 83,6 kg CO₂/GJ (PAOLINI et al., 2018) értékkel számolva: 1 255 t CO₂/év.

3.4. A gazdasági kalkulációkhoz felhasznált egyéb tényezők (árfolyam, egységárak)

- EUR árfolyam: 315 Ft/EUR
- Kiváltott villamos áram egységára: 30,15 Ft/kWh (EUROSTAT, 2018a)
- Megújuló alapú villamosenergia-termelés egységára: 32,59 Ft/kWh (MEKH, 2019)
(A megújuló energiaforrásból termelt villamos energia támogatott ára az 1 MW alatti új erőműegységekre vonatkozóan 2019. január 1-től.)
- Kiváltott/értékesített hőenergia egységára: 2,70 Ft/MJ (EUROSTAT, 2018b)

3.5. A kalkulatív kamatláb és felhasznált input- és outputadatok árszínvonal-változásának meghatározása

3.5.1. Kalkulatív kamatláb

A gazdaságossági vizsgálatok elvégzéséhez, dinamikus mutatószámok számításához választott kamatláb meghatározására több mód ismert. A lehetőségek számbavételét követően a Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal által kiadott módszertani útmutatót vettem alapul. A diszkontlábat a képletben szereplő adatok frissítésével határoztam meg (MEKH, 2012), az átlagos tőkeköltség (WACC) mutató képlete alapján:

$$r = WACC = Re \times E + Rd \times (1 - t) \times D$$

Jelölések:

- Re : a saját tőke költsége, azaz a befektetések után elvárt megtérülés;
- Rd : a hitel (kötelezettségek) költsége, azaz a felvett hitelek után fizetendő kamatteher;
- E : a saját tőke – azaz a részvényesek befektetésének – aránya a beruházási költségből;
- D : a hitel aránya a beruházási költségből (kötelezettségek);
- t : a társaság marginális adókulcsa.

Mivel a kalkulációkban idegen tőke bevonásával, illetve hitel felvételével nem kalkulálok, így a saját tőke költségéből adódik az alkalmazandó diszkontráta:

$$Re = Rf + \beta \times ERP$$

Jelölések:

- Rf : becsült kockázatmentes nominális hozam Magyarországon;
- β : iparági béta;

- ERP: piaci kockázati prémium.

A kockázatmentes hozamot az ÁKK Zrt. honlapján található benchmark adatok alapján határoztam meg, a 2018. év végi hozam alapján, melynek értéke 3,77.

Az iparági béta becsléséhez Damodaran (2019a) publikációját használtam fel. Az adatbázisban a különböző szektorokra jellemző iparági béta értékek szerepelnek, melyeket az egyedi béta értékekből képzett számtani átlag alapján kalkulálnak. A „Green & Renewable Energy” szektor bétája ez alapján 0,8.

A piaci kockázati prémiumot szintén Damodaran (2019b) alapján határoztam meg. A MEKH útmutatója alapján a piaci kockázati prémium esetében nem szükséges további ország-kockázati prémiumot megadni, ugyanis a WACC számítás módszertanában kockázatmentes hozamként a magyar államkötvény hozama szerepel, ami már magában foglalja a magyarországi beruházások kockázati felárát. Így magyar viszonylatban is használható a közel 6%-os piaci kockázati prémium érték.

Így a saját tőke elvárt nominális hozama:

$$Re = 3,77 + 0,8 \times 5,96 = 8,55\%$$

Amennyiben hitel felvételével, illetve törlesztésével is kalkulálnánk, úgy a hiteltőke költségét a BUBOR¹¹ értékéből kiindulva, valamint ahhoz kb. 4%-os hitelprémiumot adva számolhatunk.

A jelenlegi monetáris politikából kifolyólag az alacsony szintű jegybanki alapkamat alapvetően befolyásolja a banki és bankközi hitelek mértékét is. Erről árulkodik a BUBOR jelenlegi alacsony szintje is, mely a 0-s szint körül mozog. Ebből adódóan a hitelfelvétel nem emelné az alkalmazandó diszkontrátát.

3.5.2. Bevételek és kiadások árváltozásának figyelembe vétele

A műtrágyaárak árváltozásánál a 2006-2017 évek árváltozásait (KSH, 2019b) alapul véve – habár az árak igen nagy volatilitást mutatnak – az ammónium-nitrát és a szuper-foszfát műtrágyák árának súlyozott átlagaként évi 6,23%-os növekedés adódik. Mivel az általam vizsgált témakörben a műtrágyaárak mellett az üzemanyagok árváltozása még nagyobb befolyásoló hatással lehet a gazdaságosságra, így az olajárakat is szükséges figyelembe venni: az OPEC árak nagymértékű ingadozása volt megfigyelhető az utóbbi 10-15 évben, mely alapján nem lehet biztos tendenciát meghatározni (statista.com, 2019). Az EIA (U.S. Energy

¹¹ Budapesti Bankközi Forint Hitelkamatláb

Information Administration) szakembereinek előrejelzése alapján azonban egy hordó olaj ára a mostani kb. 70 USD egységárról 2025-re meghaladhatja a 85 USD-t, 2030-ra 93 USD körüli ár várható, míg 2040-re 106 USD/hordó, 2050-re pedig 113,5 USD hordónkénti árat prognosztizálnak (thebalance.com, 2019). Az EUROSTAT adatbázisa alapján a villamos áram ára az utóbbi időszakban az energiahordozók világpiaci árának alakulásából kifolyólag nem növekedett, hanem inkább minimális mértékben csökkent. Az előrejelzések alapján viszont a közeljövőben a villamos áram- és a földgázárak fokozatos emelkedése várható. Ennek kiváltó oka lehet például: (1) az elektromos hajtású járművek egyre növekvő energiaigénye; (2) a környezetvédelmi célok teljesüléséhez elengedhetetlen szerkezeti átalakítás szükségessége (erőművi portfólió átalakítása); (3) a szén-dioxid-kvóta emelkedő ára és a kilátásba helyezett kvótakivonások; (4) a megújulóenergia-alapú erőművek terjedése által szükséges tároló/szabályozó kapacitás kiépítésének szükségessége, továbbá (5) a megfelelő szabályozás érdekében várhatóan újonnan épített gázerőművek kereslete (NAK, 2018). Az előzőekből, valamint a kőolaj egységárának várható fokozatos növekedéséből kifolyólag évente kb. 3%-os árszínvonal-növekedés feltételezhető. Ennél fogva kalkulációimban éves szinten 3%-os árnövekedést feltételezek mind a költségek, mind a bevételek (energiahordozók és műtrágya kiváltásából adódó megtakarítások) vonatkozásában.

3.6. A károsanyag-kibocsátás számításához felhasznált fajlagosok

- Villamosenergia-termelés kibocsátása: 0,706 kg/kWh (KVVM, 2014)
- Hőenergia-termelés kibocsátása: 0,273 kg/kWh (KVVM, 2014)
- Műtrágyagyártás fajlagos CO₂-kibocsátása
 - N-hatóanyag gyártása: 3,47 kg CO₂/kg hatóanyag (I20)
 - P₂O₅-hatóanyag gyártása: 0,54 kg CO₂/kg hatóanyag (I20)
- Energiaültetvény munkaműveleteinek fajlagos üzemanyag-felhasználás és CO₂-kibocsátás meghatározása: saját kalkulációk SPEIGHT (2011), AGROINFORM (2016), BAI et al. (2017) és ECOSCORE (2019) alapján
- Szennyvíziszap-komposzt előállítás CO₂-kibocsátása: 1,18 t/t (TÓTH, 2017)

4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS AZOK ÉRTÉKELÉSE

A kutatómunka során megismert szakirodalom, valamint üzemi adatgyűjtéseim és szakmai konzultációim alapján a három különböző tisztítási technológia esetében a következő kiegészítő lehetőségek vehetők számításba (9. táblázat).

9. táblázat: Az egyes alaptechnológiák kiegészítő lehetőségei

Technológia megnevezése	Természetközeli	Élőgépes	Eleveniszapos
Szennyvízhő-hasznosítás	-	-/+	-/+
Szennyvíziszap-rothasztás és kogeneráció vagy biometán-előállítás és felhasználás	-	-/+	+
Szennyvíziszapkomposzt-hasznosítás és tápanyag-gazdálkodás	-	-/+	+
Energiaültetvényes biomassa-termelés és hasznosítás	-/+	-/+	+
Tisztított szennyvíz és füstgáz CO ₂ -tartalmának hasznosítása algás tavakban	-	-/+	+
Napelemes energiatermelés	-	+	+

Jelmagyarázat: (+) Igen; (-) Nem; (-/+) Lehetséges

Forrás: saját szerkesztés

Ahogy a táblázatban látható, az energiatermelési, tápanyag-gazdálkodási és CO₂-kibocsátás-csökkentési lehetőségek feltételei – döntően azok méretéből és technológiai sajátosságaiból adódóan – kutatásaim alapján egyértelműen az eleveniszapos technológiánál teljesülnek teljeskörűen, illetve ennél valósíthatók meg legnagyobb valószínűséggel. A természetközeli (vizsgálatomban elsősorban gyökérszónás) telepeken – habár kellő nagyságú terület és precíz megvalósítás esetén jó minőségű, költséghatékony tisztításra képesek – minimális lehetőség van a kiegészítő technológiák rendszerbe integrálására. Élőgépes technológia esetében – mely üvegház jellegű épületben, speciális medenceterek kialakításával és különböző növény-, illetve állatfajok beiktatásával kiváló minőségű tisztító hatást ér el – kisebb-közepes kapacitása miatt általánosságban nincs megvalósítva a szennyvíziszap rothasztására alapozott energiatermelés. Emellett a szakemberek elmondása alapján a keletkező szennyvíziszap mezőgazdasági hasznosítása is legtöbb esetben akadályba ütközik a relatíve kis mennyiségű és változó minőségű szennyvíziszap, az engedélyeztetési folyamat nehézségei, valamint az ehhez kapcsolódó szigorú előírások miatt. Így az ezeken a telepeken keletkező szennyvíziszapot információim szerint legnagyobb hányadban nagyobb regionális tisztító telepekre szállítják, és ott dolgozzák fel.

Ennek megfelelően, az élőgépes technológiára vonatkozó napelemes energia-önellátás lehetőségeinek, gazdaságosságának ismertetése mellett elsődlegesen az eleveniszapos technológiához kapcsolható kiegészítő elemekkel foglalkozom.

A szennyvíz energiatartalmának hasznosítási lehetőségeit, a rendszerszinten elérhető pozitív hatásokat és eredményeket – a vízminőség és telep méret mellett – alapvetően meghatározza az alkalmazható kiegészítő technológiák köre. A lehetséges eljárások ismertetése előtt azonban fontos bemutatni mind a bemenő, mind a tisztított szennyvíz tápanyagtartalmát. Ahogy korábban már említésre került, a szennyvíztelepre beáramló szennyvíz, illetve a tisztítást követően majd a természetes befogadóba engedett tisztított víz komoly tápanyag-tartalmat rejt magában. Számításaim szerint egy egység méretű, 100 000 LEÉ kapacitású telepnél ez a következő mennyiséget, illetve értéket jelenti (10. táblázat):

10. táblázat: Az egység méretű telepre érkező szennyvíz és kifolyó tisztított víz tápanyag-tartalma

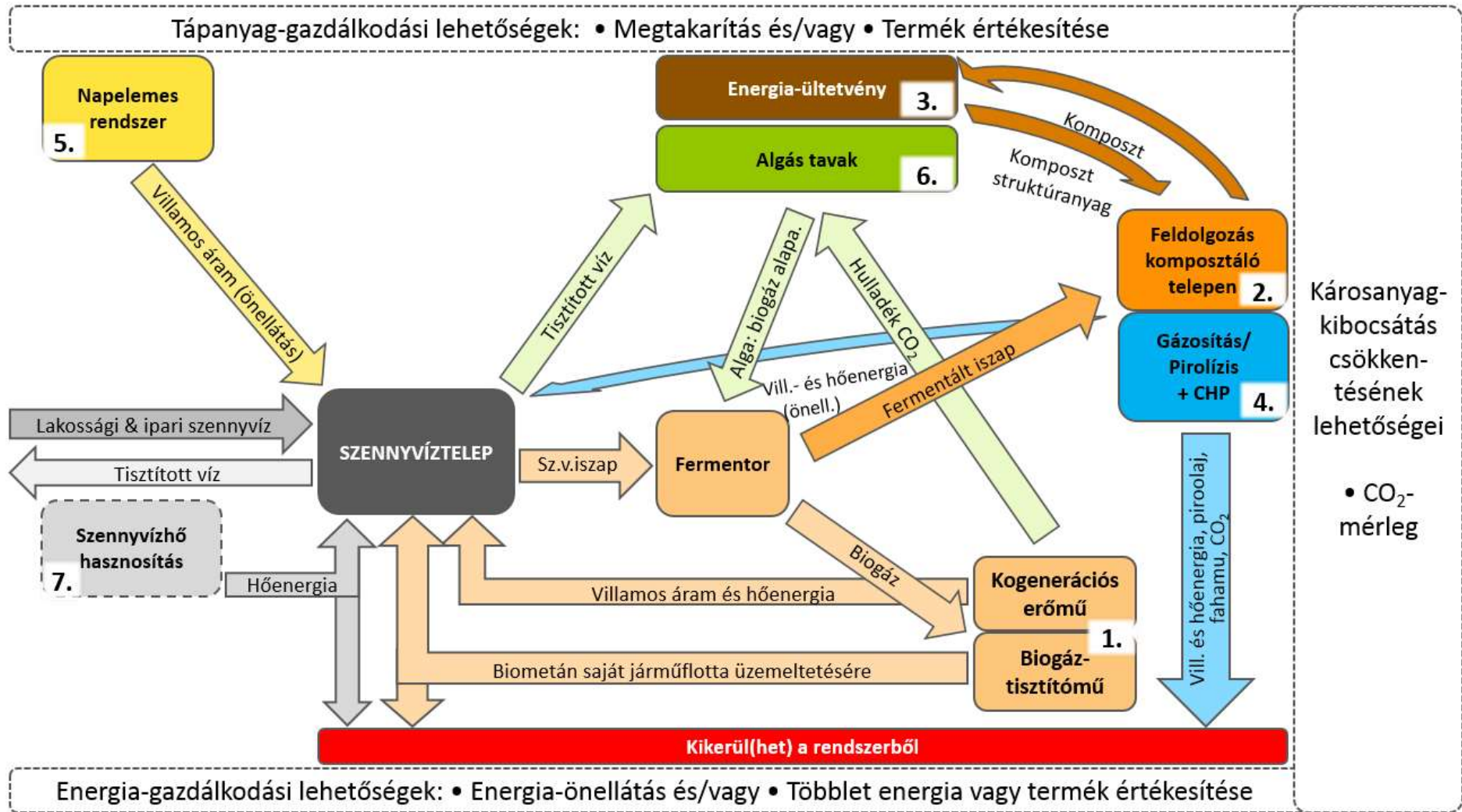
Makro- elem	Fogadott szennyvízben lévő menny.		Egységár	Érték	Kimenő szennyvízben maradó menny.		Egységár	Érték
	mg/l	t/év			mg/l	t/év		
TKN ¹	100	475	216	102 490	15	71	216	15 370
TP ²	15	73	339	24 770	1	5	339	1 610

Jelmagyarázat: ¹Összes Kjeldahl Nitrogén (az ammónium-N és a szerves-N összege) ²TP: összes P

Forrás: saját számítás

A 10. táblázatban megfigyelhető, hogy a szennyvíztelepre érkező napi 13 000 m³ szennyvíz makroelem-tartalma igen jelentős mind a bemenő szennyvíz (102,5 millió Ft, ill. 24,7 millió Ft), mind a kimenő tisztított víz (15,4 millió Ft, illetve 1,6 millió Ft) esetében.

Az általam összeállított – körforgásos gazdaság elvén alapuló – koncepcióban a potenciálbecslés és a részletes gazdaságossági kalkulációk során figyelembe vett technológiai elemeket és azok kapcsolódási lehetőségeit szemléltetem a 8. ábrán. Vizsgálatom eredményeit az ábrán látható számozás, illetve sorrend szerint részletezem.



8. ábra: A szennyvízre alapozott körfolyamat lehetőségei

Forrás: saját szerkesztés

Az összes rendszerelem esetében számszerűsítettem azok energia-, tápanyag- és CO₂-gazdálkodásra kifejtett hatását, számításaim eredményeit a következőkben ismertetem.

4.1. Szennyvíziszap-rothasztás után kogeneráció vagy biometán-előállítás

A 100.000 LEÉ egységmértű telepen anaerob szennyvíziszap-rothasztás esetén évente megtermelhető biogáz-mennyiség kb. 679 ezer m³/év, melynek metántartalma 441 ezer m³/év. Az előállított termék (biogáz vagy tisztítással biometán) két fő hasznosítási módját lehet megjelölni, melyek (1) a kogenerációs energiatermelés, valamint (2) a biogáz tisztítását követő biometán-felhasználás/értékesítés. A két felhasználási irány a legtöbb esetben kizárja egymást, világszinten mindösszesen néhány telep van, ahol kombinált hasznosítás történik.

(1) Kogenerációs energiatermelés és energia-önellátás

Ennek során mind hő-, mind villamos energia keletkezik. A kogenerációs energiatermelés elsődleges célja általában a telepi energia-önellátásra való törekvés, emellett lehetőleg a keletkező többletenergia teljes mennyiségének értékesítése vagy felhasználása.

A kogeneráció által biztosított energia-önellátás mértékének megállapításához szükséges a telep fajlagos villamos-, illetve hőenergia-igényének ismerete. SÜTŐ – HOMOLA (2008) hazai telepekre vonatkozó felmérését saját üzemi adatgyűjtéssel kiegészítve a következő egyenletet határoztam meg a telepi villamosenergia-igényre vonatkozóan, a bemenő vízmennyiség (m³/nap) függvényében, beépítve a telepméret fajlagos villamosenergia-igényt módosító hatását:

$$y = 1,909x^{-0,24}$$

ahol: y = telep fajlagos energiafogyasztása (kWh/m³), x = a szennyvíztelep kapacitása (100 m³ szennyvíz/nap mennyiségben)

Az egyenletet a különböző méretű telepeken mért fajlagos áramfelhasználás tényadataira illesztve, trendfüggvény felvételével határoztam meg. A meghatározott egyenlet megfelelőségét támasztják alá az ENERWATER (2019), MIZUTA - SHIMADA (2010), XU et al. (2017) és GU et al. (2017) fajlagos energiafelhasználás és telepméret kapcsolatával foglalkozó publikációi. Ily módon a telepméret változtatásával – a fajlagos energiaigény csökkenésének köszönhetően – értelemszerűen eltérő energia-önellátási jellemzők, arányok érvényesülnek.

A fenti képlet alapján a 100 000 LEÉ terhelésű telep fajlagos villamosenergia-igénye: 0,593 kWh/100m³ szennyvíz. A telepi hőenergia-igény BÁNYAI et al. (2014b) alapján az összes energiafelhasználás átlagosan 40%-a.

A kogenerációs energiatermelésre, illetve energia-önellátásra irányuló kalkulációimat a 11. táblázatban mutatom be.

11. táblázat: Kogenerációs energiatermelés és -önellátás, valamint a többlet hőenergia értékesítése

Fajlagos villamosenergia-igény (kWh/m ³):	0,59
Villamosenergia-igény (ezer kWh/év):	2 814
Villamosenergia-termelés biogázból (ezer kWh/év):	1 766
Villamosenergia-önellátás:	63%
Megtakarítás (millió Ft/év):	53,2
Fajlagos hőenergia-igény (kWh/m ³):	0,40
Hőenergia-igény (ezer kWh/év):	1 876
Hőenergia-igény (ezer MJ/év):	6 753
Hőenergia-termelés biogázból (ezer kWh/év):	1 986
Hőenergia-termelés biogázból (ezer MJ/év):	7 151
Hőenergia-önellátás:	106%
Megtakarítás (millió Ft/év):	19,3
Összes megtakarítás (millió Ft/év):	72,5

Forrás: saját számítás

A villamos-, illetve hőenergiatermelésre és -felhasználásra vonatkozó fajlagosokat felhasználva egy egységmértetű, eleveniszapos technológiájú telep számításaim szerint részleges (63%-os) villamosáram-önellátást, míg teljes (106%-os) hőenergia-önellátást képes megvalósítani. Mindez éves szinten összesen 72,5 millió Ft-os megtakarítást jelent az energiaköltségekből, beleszámítva a kismértékű többlet hőenergia értékesítését is. Amennyiben azonban a biogáz működési költségeket is tartalmazó fajlagos előállítási költségét is figyelembe vesszük, a megtakarítás értéke jelentősen csökken. Kalkulációim alapján – mivel a folyamatosan beáramló alapanyag ingyen áll rendelkezésre – kedvező, 53-60 Ft/m³ biogáz önköltség érhető el. Ebben az esetben a saját energiaigény kiváltásából adódó megtakarítás nagyjából fele (34,5 millió Ft) marad meg. A kogenerációval egészen 106 Ft/m³ biogáz-önköltségig érhető el megtakarítás az energiaköltségeken, ezt meghaladó fajlagos előállítási költség esetén már veszteséget termelne a telep.

A szennyvíztelepen már meglévő rothasztó technológiát feltételezve a kogenerációs egység beruházási költsége valamivel több, mint 81 millió Ft.

(2) Biometán-tisztítás és hasznosítás

Másik lehetőség a biogáz speciális módon történő tisztítása, majd ennek földgáz-hálózatban vagy hajtóanyagként történő felhasználása. A biometán-termelés – figyelembe véve a tisztítás hatásfokát, veszteségét – 415 ezer m³/év.

A biogáz-tisztítás és biometán-értékesítés lehetséges bevételei, valamint becsült beruházási költsége a hasznosítási módtól függően:

- 1. Földgáz-hálózatba táplálás (Ft/év): 38,1 millió Ft
 - Gáztisztító beruházási költsége (töltő nélkül) (Ft): 204,3 millió Ft
- 2. Hajtóanyagként történő értékesítés esetén (Ft/év): 114,3 millió Ft
 - Gáztisztító és -töltő beruházási költség (Ft): 234,8 millió Ft

Ha összevetjük az energia-önellátás során kiváltható fosszilis energiahordozók (mint megtakarítás) értékét, valamint a hőenergia, illetve hajtóanyag-értékesítés bevételeit, a következő sorrend állítható fel (12. táblázat).

12. táblázat: Az elérhető megtakarítások és árbevételek a biogáz-hasznosítás céljának függvényében

Biogáz/biometán hasznosítás célja	Beruházási költség (millió Ft)	Bevétel és/vagy megtakarítás (millió Ft/év)	Termék előállítási költsége (millió Ft/év)	Egyenleg (millió Ft/év)	Sorrend (Egyenleg/Beruh. aránya alapján)
Kogenerációs energiatermelés (önellátás és értékesítés)	81,3	72,5	37,3	27,7	1. (34%)
Biometán értékesítése hajtóanyagként	234,8	114,3	43,9	61,8	2. (26%)
Biometán földgáz-hálózatba táplálása	204,3	38,1	38,2	-7,6	3. (-4%)

Forrás: saját számítás

Az általam figyelembe vett input- és outputfajlagosok, árak és beruházási költségek alapján rövidtávon a kogenerációs energiatermelés előnyösebb gazdaságilag, míg közép- és hosszútávon a hajtóanyagként történő biometán-értékesítés képes magasabb profit termelésére. A gazdaságossági mutatók alakulására komoly befolyásoló hatása a választott technológiának (pl. a biogáztisztító típusa) a beruházási költségeken keresztül, továbbá az adott termék fajlagos előállítási árának is. A kogenerációs energiatermelés esetében a 66 Ft/m³ önköltség helyett 106

Ft/m³-es, míg a hajtóanyagként történő értékesítés esetén a 126 Ft/m³ önköltség helyett 275 Ft/m³ fajlagos előállítási költség eredményez „nullszaldót”.

4.2. Fermentált iszap komposztálása és kihelyezése energetikai ültetvényre

A faapríték mint komposztálás során felhasznált struktúrányag, igen kedvező tulajdonságokkal bír (KÁRPÁTI, 2014). A kialakított koncepcióban a komposztálás során az energiaültetvényekről származó faapríték szolgál struktúrányagként, amelynek egy jelentős része a visszarostálást követően ismét hasznosítható.

Figyelembe véve a hazai telepeken keletkező kierjedt iszap-mennyiség fajlagosát (0,35 kg iszap sz.a./m³), számításaim szerint napi 4,55 t iszap szárazanyagának (~1.661 t iszap sz.a./év) megfelelő mennyiségű rothasztott iszap keletkezik. Ezen mennyiség komposztálásához KÁRPÁTI (2014) alapján – 2:1-es struktúrányag/szennyvíziszap térfogatarányra törekedve – közel 2 000 t sz.a./év faaprítékra (struktúrányag) lenne szükség. A struktúrányag jelentős része (közel 80%-a) visszarostálásra kerül későbbi felhasználás céljából, így számításaim szerint összesen nagyságrendileg 1.160 t sz.a./év kirostált komposzt állítható elő az összesen kb. 25-30 napos komposztálási folyamat végén. 2,1%-os TN-tartalommal kalkulálva a komposztanyag nitrogén-hatóanyag tartalma évente kb. 24,4 tonna. A vonatkozó előírások alapján maximálisan évente szennyvíziszap-komposztként kihelyezhető mennyiség 170 kg N-hatóanyag. Mivel a fás szárú energiaültetvényekben két évente, vagyis a betakarítás éveiben érdemes, illetve szükséges a tápanyag-utánpótlás, a maximálisan kihelyezhető hatóanyag-mennyiséggel számolva ez évente 145 hektárra helyezhető ki. Ez egyben azt is jelenti, hogy két évente történő tápanyag-utánpótlás esetén kb. 290 hektár energiaültetvény telepítése szükséges, lehetőleg minél közelebb a szennyvíztisztító telephez, a szállítási költségek minimalizálása, valamint a logisztikai nehézségek (TÉGLA et al., 2012) megkönnyítése érdekében. A két éves vágásforduló választásának okai között említhető meg, hogy egyrészt napjainkban általánosan alkalmazott, bevált vágásfordulóként jelölhető meg, másrészt pedig ily módon mind a szennyvíziszap-kihelyezés, mind a faanyag-betakarítás mennyisége kiegyenlítettebb ahhoz képest, mintha hosszabb vágásfordulót alkalmaznánk.

Ahogy FOGARASSY - NÁBRÁDI (2015) is megemlíti, a fentiekén keresztül az anyag- és energiatakarékossági célkitűzések mellett jelentős károsanyag-kibocsátás is elkerülhető, mégpedig elsődlegesen a földgáz-alapú nitrogénműtrágya előállítási és szállítási költségeinek kiváltásával, valamint a kiváltott fosszilis energiahordozók (hőenergia és villamos energia, vagy pedig hajtóanyag) felhasználása során a CO₂-kibocsátás elkerülésével. Erre vonatkozó számításaimat a rendszerszintű hatások összefoglalásánál ismertetem.

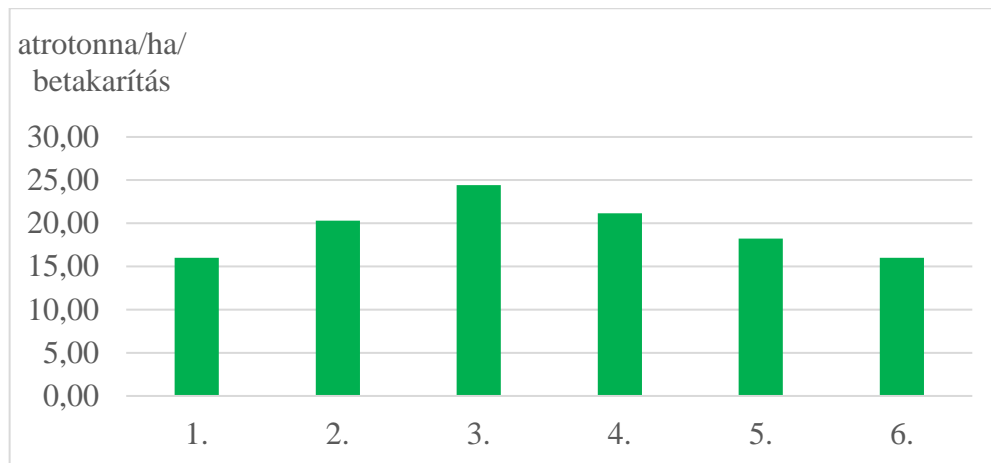
A folyamatos szennyvíziszap-felhasználás, valamint faapríték-betakarítás és -felhasználás érdekében mindenképpen szükségesnek tartom a két vagy négy telepítési ütemben (egymást követő években) történő ültetvény-telepítést. Ily módon a faaprítékra (és emellett esetleg szennyvíziszapra) alapozott gázosító vagy pirolizáló berendezés üzemeltetése is szünetmentes lehetne, amely alapvető követelmény a megfelelő kihasználtság, így a gazdaságos működés és a beruházás minél előbbi megtérülése szempontjából.

4.3. Energiaültetvényen történő komposzt-hasznosítás és faapríték-termelés

Mivel számos esetben aggályosnak, kockázatosnak minősülhet a szennyvíziszap-komposzt felhasználása élelmiszcélú területen, így annak energianövény-termőterületre való kijuttatásával kalkulálok, amely akár jelentős mértékben képes csökkenteni a tápanyagtartalom mellett a nehézfém-tartalmat is. Ily módon két előny egyesítésére adódik lehetőség: egyrészt a növény csökkenti a káros nehézfém-tartalmat, másrészt pedig a keletkező biomassa energetikai célból válik felhasználhatóvá, javítva a tisztítási tevékenység gazdaságosságát.

Szükséges hozzátenni, hogy a leginkább eredményesen alkalmazható fafajt természetesen minden esetben az adott térség, illetve terület termőhelyi adottságai határozzák meg. Magyarországon az energetikai célú termesztésben három fafaj terjedt el, melyek a nyár, a fűz és az akác. Ezek telepítése változó termőhelyi adottságok mellett történt, illetve történik, ugyanakkor általánosságban elmondható, hogy a fűzültetvények jellemzően a nedvesebb, vizes régiókra koncentrálódnak, míg az akác a leggyengébb, legszárazabb termőhelyre ültethető és létjogosultsága elsődlegesen az erodált talajokon van (VÁGVÖLGYI, 2013). GERENCSÉR (2012) szerint a nyarak genetikai adottságaiknál fogva nagyobb növekedésre képesek a fűzeknél, és a Kárpát-medencét elsődlegesen nyár termőhelyként jelöli meg.

Az energiaültetvényes faapríték-termelés becsléséhez, tervezéséhez első lépésben szükséges volt a komposztálással elérhető biomassa-hozamok meghatározása. Számításaimban saját adatgyűjtésemet, BOROVIČS (2007) által publikált adatokat, valamint a „2.6.4. Energiaültetvényes biomassa-termelés és hasznosítás” alponban említett magyarországi kutatásokat alapul véve határoztam meg a nemesnyár energiaültetvény hozamgörbáját (9. ábra).



9. ábra: Az energiaültetvény becsült hozama (abszolút száraz tonna/ha/betakarítás)

Forrás: saját szerkesztés

Ahogy láthatjuk, a harmadik betakarításnál éri el az ültetvény a legnagyobb hozamot, majd ismét csökkenni kezd. Ezt követően összeállítottam az energetikai ültetvények termesztéséhez (talaj-előkészítéstől és -bevizsgálástól kezdve az ültetvény felszámolásáig) kapcsolódó gépi munkaműveleteket, ráfordításokat és becsült hozamokat tartalmazó modellt (13. táblázat), két egymást követő évben 1-1 hektár területen történő ültetvény-telepítésre vonatkozóan. Az 1-1 hektár, mint vetítési alap alkalmazása a szennyvíziszapkomposzt-kihelyezés, valamint a faanyag-betakarítás folyamatossága miatt szükséges. Ily módon lehetőségem nyílt arra, hogy meghatározzam a szennyvíziszapkomposzt-hasznosítással történő faapríték-termelés önköltségét, energiamérlegét, majd pedig CO₂-mérlegét.

13. táblázat: Nyár energiaültetvény ráfordításai, költségei két egymást követő évben 1-1 ha-on történő telepítésnél, 2 éves vágásfordulóval

KIADÁS, TEV. MEGNEVEZÉS (ezer Ft)	Évek														
	1. év	2. év	3. év	4. év	5. év	6. év	7. év	8. év	9. év	10. év	11. év	12. év	13. év	14. év	15. év
Termőhely-feltárás és talajelőkészítés	61	61													
Szaporítóanyag és gépi ültetés		319	319												
Gyomirtás, növényvédelem		30	30												
Sorközművelés		16	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Szennyvíziszap komposzt és -kijuttatás, bevizsgálás		113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113		
Műtrágya és -kijuttatás megtakarítás		-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68		
Betakarítás és szállítás			154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	
Ültetvény felszámolása														100	100
KÖLTSÉGEK ÖSSZESEN (Ft)	61	470	571	222	231	231	239	239	232	232	226	226	222	277	124
Hozam (atrotonna)	0	0	16,0	16,0	20,3	20,3	24,4	24,4	21,1	21,1	18,2	18,2	16,0	16,0	
Önköltség (Ft/atrotonna)	16 380														

Forrás: saját számítás saját adatgyűjtés és NÉMETH (2011), GABNAI (2011), AGROTREND (2017), POSZA (2018) alapján

Jellemző paraméterek:

- Termőhely-feltárás és talajelőkészítés: tarlóhántás, őszi mélyszántás, tárcsázás
- Szaporítóanyag és gépi ültetés: sima dugvány, 6 600 db/ha + 8% pótlásra
- Gyomirtás, növényvédelem: preemergens gyomirtás
- Sorközművelés: tárcsázás, 1-2 alkalom/év (betakarítás éveiben 1 alkalom, köztes években 2 alkalom)
- Szennyvíziszapkomposzt és -kijuttatás, bevizsgálás: komposztszállítás, valamint komposzt és talaj bevizsgálás (20 t/ha, 50% sz.a.)
- Műtrágya és műtrágyakijuttatás-megtakarítás: 0,62 t/ha ammónium-nitráttal és 0,5 t/ha szuperfoszfáttal kalkulálva (a komposztrágya hatóanyag-tartalma alapján)
- Betakarítás és szállítás: szállítás (105 Ft/tkm); szállítási távolság (10 km); betakarítás (120 000 Ft/ha)

A szennyvíziszap-komposzt hasznosítás beillesztésével – mely egyben műtrágya-kiváltást is eredményez – elvégzett energiaültetvényes számításaim során a korábbiakban ismertetett diszkontlábat és input-output árszínvonal-változásokat alkalmazva meghatároztam az előállított faapríték önköltségét. Az energiaültetvény egy életciklusa során felmerülő termelési költségek összegének, valamint a betakarítások során lekerülő összes faanyag hányadosaként 16 380 Ft/atrotonna önköltséget kaptam. Ezt az értéket használtam fel a későbbiekben az energiatermelési célból működtetett kogenerációs művel összekötött faelgázosító berendezés tüzelőanyag-igényének fedezésénél.

A műtrágya-kiváltás és az ebből adódó megtakarítás (szállítással együtt számított) értéke éves szinten 68 ezer Ft/ha, amelyet a szennyvíziszap-komposzt talajerő-gazdálkodási célból történő alkalmazásával kiváltunk. Ezzel szemben a komposzt trágyaként történő felhasználása a komposzt előállítási költsége és az adódó (oda-vissza 10-10 km-es távolságnak megfelelő) szállítási költségek miatt éves szinten összesen 113 ezer Ft-os költséget jelent, egy hektárra vetítve. A modell alapján, ha nem komposzttal, hanem a hagyományos úton, műtrágyával történne az ültetvény tápanyag-utánpótlása, úgy 17 600 Ft/atrotonna önköltséget kapnánk. Ez fajlagosan kb. 1 200 Ft megtakarítást jelent egy atrotonna aprítékra számítva. Amennyiben a Szennyvíziszap Hasznosítási Stratégia 2014-2023 dokumentumban megjelölt 46 Ft/tkm szállítási költséggel számolnánk, úgy a komposzt-hasznosítással történő apríték-előállítás esetén 14 740 Ft/atrotonnás önköltséget kapunk, ami 8%-os költségcsökkenés a 105 Ft/tkm-mel kalkulált önköltséghez képest. Kalkulációimat magasabb, 126 Ft/tkm szállítási költség mellett is elvégeztem (a szállítási útvonalon 1:5 földút - közút arányt feltételezve): ily módon közel 16 960 Ft-os önköltség adódik, 10%-os nettó jelenérték-csökkenést eredményezve.

Az összesen 290 ha energiaültetvényen az általam meghatározott hozamgörbe alapján megtermelhető apríték kétévente, vagyis betakarításonként 16,0 – 24,4 atrotonna között változik az ültetvény életkorától függően. A becsült hozam megfelel az általam áttekintett – „Anyag és módszer” fejezetben ismertetett szakirodalmaknak, ugyanakkor érzékenység- és küszöbérték-vizsgálat keretében vizsgálom azt a kérdést, hogy pontosan milyen hatással lenne a hozamok változása a faapríték-termelés jövedelmezőségére, illetve mekkora a megengedhető csökkenés zéró NPV eléréséhez.

A megtermelt faapríték energiataralma, valamint a biomassza-előállítás tevékenységeihez szükséges energia-ráfordítás alapján a rövid vágásfordulójú nemesnyár energetikai ültetvény energiamérlege 1:29 (input: output arány). Ez az érték összhangban van CZUPY et al. (2015) eredményeivel, ahol eltérő nagyságú energiaültetvények esetében 1:46, 1:37, illetve 1:30 energiamérleget kalkuláltak.

Amennyiben a megtermelt faaprítékot átlagos átvételi áron, vagyis 20 000 Ft/a.t. egységáron (POSZA, 2018 alapján) értékesítenénk, úgy várhatóan a következő gazdaságossági mutatók érvényesülnének a kéthektáros, egymást követő évben telepített energiaültetvényen (14. táblázat).

14. táblázat: Az ültetvény gazdaságossági mutatói

Mutató	Érték
Nettó jelenérték (NPV) (Ft):	754 100
Jövedelmezőségi index (PI):	2,15
Diszkontált megtérülési idő (DPP) (év):	6,5 év
Belső megtérülési ráta (IRR):	24%

Forrás: saját számítás

A táblázat értékei kedvezőnek mondhatók, ugyanakkor megállapítható, hogy bizonyos tényezők, mint a szállítási távolság, illetve az elérhető hozam, jelentős mértékben módosítják az értékeket. Az energiaültetvény költségeit és bevételeit, valamint pénzáramait a II. számú melléklet tartalmazza.

A legfontosabb tényezők változása esetén érvényesülő hatások szemléltetése érdekében érzékenység-vizsgálatot végeztem e két tényező, továbbá az energiamérleg (input:output) hányadosára és a kéthektáros ültetvény nettó jelenértékére vonatkozóan (15. táblázat). Az energiaültetvény teljes életciklusára vonatkozó energiamérlegének meghatározásakor az energiainput értékét a természetstechnológia összes szükséges munkaműveletének üzemanyag-felhasználását összeadva kaptam meg (beleértve a komposzt- és aprítékszállítást is). Ezzel szemben az energiaoutput értékét az ültetvényeken előállítható aprítékhozamból kiindulva, a fűtőérték figyelembe vételével kalkuláltam.

15. táblázat: A szállítási távolság hatása az energiamérlegre és az NPV-re

Szállítási távolság (km)	Energiamérleg (Input/Output hányados)	NPV (ezer Forint)
10	1:36	754
20	1:29	363
30	1:25	-28
40	1:21	-419

Forrás: saját számítás

A táblázatban látható, hogy 30 km-es szállítási távolság esetén már a 0 érték alá csökken az NPV (20 000 Ft/a.t. felvásárlási áránál), míg az energiamérleg még 40 km-es szállítási távolságnál is kedvezőnek mondható.

A faapríték-hozam kezdeti értékének (16 a.t. az első betakarításnál) módosítása a következő hatással van a vizsgált két mutatóra (16. táblázat):

16. táblázat: A kezdeti aprítékhozam hatása az energiamérlegre és az NPV-re

Kezdeti aprítékhozam (a.t.)	Energiamérleg (Input/Output hányados)	NPV (ezer Forint)
16 (bázisérték)	1:36	754
+ 1 változás	1:37	934
+ 2 változás	1:39	1 113
-1 változás	1:34	575
-2 változás	1:32	395

Forrás: saját számítás

Küszöbérték-vizsgálatom szerint zéró NPV 11,8 a.t./betakarítás értéknél (első betakarítás) adódna, azzal is kalkulálva, hogy az ültetvény életkorának közepéig jellemzően nő a hozam, majd pedig elkezd csökkenni. Amennyiben fás szárú energetikai ültetvény telepítése céljából sem kielégítő minőségű a terület, a hozam a fenti érték alá csökkenhet, bár a szennyvíziszap-komposzt a kutatások alapján jelentősen javíthatja a talajminőséget.

4.4. A megtermelt biomassa felhasználása gázosító vagy pirolízis erőműben és CHP-ben, majd energia-önellátás és a többletenergia értékesítése

A szennyvíztelep energetikai önellátásának biztosítása érdekében – mivel a biogázból származó villamos áram mennyisége körülbelül a telepi energiaigény 60-70%-át képes fedezni – jó lehetőség adódhat az energiaültetvényeken megtermelt faapríték villamos- és hőenergia-termelési célú hasznosítására.

Gazdaságossági kalkulációimat – a teljes energetikai önellátás érdekében – PATEL et al. (2016) és UCHMAN (2017) alapján egy kogenerációs erőművel összekötött gázosító műre vonatkozóan végeztem el, a saját termelésű faaprítéket önköltségi áron figyelembe véve.

A faelgázosító és hozzá kapcsolt CHP berendezés szükséges teljesítményének meghatározásánál kétféle verzióra vonatkozóan végeztem kalkulációkat:

- A teljes villamosáram-önellátás megvalósításához szükséges teljesítményű rendszer kiépítése és üzemeltetése
- A komposztált területeken megtermelt teljes apríték mennyiség felhasználásához szükséges teljesítményű rendszer kiépítése és üzemeltetése

(1) A teljes villamosáram-önellátás megvalósításához szükséges teljesítményű rendszer kiépítése és üzemeltetése

Az energia-önellátáshoz szükséges 1,048 millió kWh villamos áram fedezése – éves szinten 8 000 üzemórát feltételezve – egy megközelítőleg 130 kW_{el} teljesítményű rendszerrel valósítható meg. A faelgázosító egységben – figyelembe véve UCHMAN (2017) vizsgálatában megjelölt paramétereket és hatásfokot – ehhez éves szinten 766 atrotonna faaprítékra lenne szükség. Ez a mennyiség az ültetvények teljes élettartamára jellemző átlaghozammal kalkulálva kb. 92 ha energiaültetvényen termelhető meg, és betakarítást követően – csonkagúla formájú aprítékhalmozatot (prizmát) és 50%-os nedvességtartalmat feltételezve – kb. 900-1 000 m² (~32 m x 32 m-es) területre lenne szükség az összes mennyiség prizmákban történő elhelyezéséhez.

A rendszerre vonatkozó gazdaságossági kalkulációk elvégzésénél az üzemi paraméterek mellett fontos figyelembe venni, hogy a kezdeti időszakban külső forrásból szükséges beszerezni az aprítékot, az ültetvény életkorának előrehaladtával pedig saját előállítású biomasszával történhet a tüzelőanyagigény kielégítése.

Számításaim szerint az alábbi gazdaságossági mutatók adódnak a villamosenergia-igény kiváltásának megfelelően méretezett rendszer esetében (17. táblázat). A rendszer működésének 15 évre (a rendszer hasznos élettartama) kalkulált nettó jelenértéke 98,6 millió Ft, diszkontált megtérülési ideje pedig 7 év.

17. táblázat: A villamosenergia-önellátásra méretezett rendszer megtérülési mutatói

Mutatók	Érték
Nettó jelenérték (NPV) (millió Ft):	98,6
Jövedelmezőségi index (PI):	2,03
Diszkontált megtérülési idő (DPP) (év):	7
Belső megtérülési ráta (IRR):	22%

Forrás: saját számítás

Küszöbérték-vizsgálat során megállapítottam, hogy a 0 NPV eléréséhez a megtermelt hőenergia közel felét, 49%-át szükséges értékesíteni. Kalkulációim alapján az energiaárak változása a következő mértékben változtatja a tevékenység nettó jelenértékét (18. táblázat).

18. táblázat: A villamos energia- és hőenergia árak hatása a nettó jelenértékre (1. rendszer)

Tényező	Változás	Hatás az NPV-re
Kiváltott villamos áram ára	- 10%	- 34%
Zöld tarifa (többletenergia értékesítése)	- 10%	- 4%
Hőenergia tarifa	- 10%	- 19%

Forrás: saját számítás

A kapott értékek alakulása meglátásom szerint elsődlegesen a minimális mennyiségű többletenergia-értékesítésből adódnak. Legnagyobb mértékű változást a kiváltott villamos áram árcsökkenése okozza (3,4%/ % csökkenés).

(2) A komposztal kezelt területeken megtermelt teljes aprítékmenyiség felhasználásához szükséges teljesítményű rendszer kiépítése és üzemeltetése

Egy további lehetőségként az összes komposztal kezelt területen megtermelt faapríték mennyisége alapján határoztam meg a szükséges kapacitást. Ennek során figyelembe vettem a faelgázosító+CHP rendszer üzemelési paramétereit, maximálisan 8 000 üzemórás éves üzemidőt feltételeztem, továbbá az egyes években változó faapríték-mennyiségek miatt egy egyszerűsítést alkalmazva a faapríték hozamainak mediánját (kb. 2 300 a.t./év) vettem alapul. A számítás alapján egy közel 360 kW_{el} rendszer képes felhasználni az évente keletkező biomassa-mennyiséget, az egyidejű tároláshoz szükséges terület pedig kb. 1 300 – 1 400 m² (~37 m x 37 m). Meglátásom szerint az ezek alapján történő méretezés megfelelően biztosíthatja a folyamatos üzemelést.

A 19. táblázatban az összes megtermelt faapríték hasznosítására méretezett berendezés költség-bevétel viszonyait, valamint diszkontált pénzáramát szemléltetem. A bevételek és költségek alakulása tükrözi az egymást követő két évben telepített energiaültetvényen jelentkező hozamkülönbségeket is.

19. táblázat: A bevételeket/megtakarításokat és költségeket tartalmazó diszkontált cash-flow a gázosító+CHP erőműnél (M.e.: millió Ft)

	Évek														
	1. év	2. év	3. év	4. év	5. év	6. év	7. év	8. év	9. év	10. év	11. év	12. év	13. év	14. év	15. év
BEVÉTELEK/ MEGTAKARÍTÁSOK															
Kiváltott villamos energia értéke	31,6	32,5	33,5	34,5	35,6	36,6	37,7	38,9	40,0	41,2	42,5	43,7	45,1	46,4	47,8
Villamos áram értékesítés bevétele	0,0	0,0	52,3	53,8	83,8	86,3	117,5	121,0	100,4	103,4	83,7	86,2	70,2	49,3	0,0
Hőenergia értékesítés bevétele	15,9	16,4	43,9	45,2	61,2	63,1	79,8	82,2	72,1	74,3	64,7	66,6	59,0	60,8	24,1
KÖLTSÉGEK															
Beruházási költség	297,3														
Működési költségek	56,2	57,9	78,0	80,3	94,3	97,2	111,8	115,1	108,7	112,0	106,0	109,2	104,9	108,0	85,1
CASH FLOW	-306,0	-9,0	51,7	53,2	86,2	88,8	123,2	126,9	103,9	107,0	84,8	87,4	69,4	48,4	-13,2
DISZKONTÁLT CASH-FLOW	-306,0	-8,3	43,8	41,6	62,1	58,9	75,3	71,4	53,9	51,1	37,3	35,4	26,0	16,7	-4,2

Forrás: saját számítás

A fenti, 19. táblázat adatainak megfelelően a gázosító mű és kogenerációs erőmű gazdaságossági mutatói a következőképpen alakulnak (20. táblázat).

20. táblázat: A teljes aprítékmenyiségre méretezett rendszer megtérülési mutatói

Nettó jelenérték (NPV) (millió Ft):	255
Jövedelmezőségi index (PI):	1,83
Diszkontált megtérülési idő (DPP):	7,4 év
Belső megtérülési ráta (IRR):	19%

Forrás: saját szerkesztés

Bár a fenti mutatók előnyösnek mondhatók, a rendszer gazdaságossága szempontjából itt is kardinális kérdés a megtermelt hőenergia értékesítése, illetve annak lehetősége, mivel a hőenergia a teljes időszakra vetítve az összes bevétel/megtakarítás átlagosan 34%-át teszi ki. A biomassza alapú erőművek esetében gyakran a hőenergia értékesítésének lehetősége alakítja negatívan a tevékenység jövedelmezőségét, gazdaságosságát.

A nagyobb szennyvíztelepek esetében számos esetben a városi távhőrendszerre van csatlakoztatva a biogáz erőmű, melynek hőtermelése így hasznosításra kerül. Az viszont természetesen mindig az adott településtől, valamint iparterület közelségétől függ, hogy jelentkezik-e megfelelő kereslet a megtermelt – jelentős mennyiségű – többlet hőenergiára, kiváltképp a nyári időszakban. Egy lehetséges hasznosítási módként említhető meg a szennyvíziszap nagymértékű szárítási energiaigényének fedezése, amely szintén fosszilis energiahordozót válthat ki, amennyiben a szennyvíziszap további felhasználása, értékesítése a cél.

Amennyiben a hőenergiát egyáltalán nem tudnánk értékesíteni, abban az esetben 208,5 millió Ft-os negatív NPV adódna a 15 éves időintervallumot tekintve. Az elvégzett küszöbérték-vizsgálat alapján, éves szinten a megtermelt hőenergia 45%-ának értékesítésére van szükség ahhoz, hogy zero nettó jelenértéket kapjunk. Számításaim alapján az energiaárak változása a következő mértékben változtatja a tevékenység nettó jelenértékét (21. táblázat).

21. táblázat: A villamosenergia- és hőenergia árak hatása a nettó jelenértékre (2. rendszer)

Tényező	Változás	Hatás az NPV-re
Kiváltott villamos áram ára	- 10%	- 13%
Zöld tarifa (többletenergia értékesítése)	- 10%	- 22%
Hőenergia tarifa	- 10%	- 18%

Forrás: saját számítás

Az eltérő rugalmasságok alapján jól látható, hogy a villamosáram-megtakarítás, a többletenergia értékesítése és a hőenergia értékesítése eltérő mértékben járul hozzá az NPV alakulásához. Legnagyobb csökkentő hatás a zöld tarifa árváltozása esetén érvényesül, a jelentős mennyiségű többletenergia értékesítési lehetősége miatt.

Ha a faapríték önköltsége valamilyen okból kifolyólag 10%-kal emelkedne (akár a szennyvíziszap magasabb önköltségi ára miatt), abban az esetben 13%-kal csökkenne az NPV. A tevékenység jövedelmezőségére az előzőektől nagyobb hatással van a biomasszahozam: 10%-os csökkenése 34%-os csökkenést eredményez a nettó jelenértékben.

Amennyiben a magasabb kötelező átvételi ár nem lenne biztosítva, vagy pedig a megtermelt többlet hőenergia értékesítése nem lenne kivitelezhető, abban az esetben a faelgázosító berendezés és gázmotoros energiatermelés helyett megfontolandó egy pirolízis technológiával működő kiserőmű alkalmazása. Ennek előnye lehet, hogy kisebb mennyiségű gáz halmazállapotú terméket állít elő, viszont nagyobb mennyiségű pirololajat termel, ami jobban tárolható és szállítható, emellett különböző nagyobb hozzáadott értékű termékeket lehet gyártani belőle (tisztítás és egyéb eljárások során).

Meglátásom szerint a faelgázosító műben történő felhasználás esetleges problematikáját a következők jelenthetik:

- A betakarított faanyag hozama – az ültetvények „öregedése” következtében – adott ültetvényen a harmadik betakarításnál éri el a maximumot, ezt követően csökkenni kezd.
- A termelt hőenergia esetleges értékesítési problémái, korlátai.
- A faanyag felhasználás előtti prizmás tárolásának, szárításának helyigénye jelentős (ez igaz a pirolízises technológia alkalmazása esetében is).

4.5. Napelemes energiatermelés és szennyvíztelepi alkalmazhatósága

A szennyvíztisztító telepeken jelentkező energiaigény részleges vagy akár teljes fedezésére kedvező lehetőséget adhatnak a napelemes rendszerek. Az elvégzett gazdaságossági vizsgálat indokoltságát főként az olyan telepek adják, ahol a telepméret vagy a technológia miatt nem gazdaságos, vagy nem megvalósítható az anaerob iszaprothasztás és energiatermelés kiépítése – ezek KÁRPÁTI (2014) alapján a kb. 40-50 000 LEÉ alatti kapacitású telepek. Ilyenek lehetnek például az élőgépes technológiával megvalósított telepek, amelyek az intenzív levegőztetés miatt jelentős energiaigénnyel bírnak, és tapasztalataim szerint az esetek nagy részében problémás a keletkező iszap hasznosítása is.

A szennyvíztelepi energia-önellátásához kapcsolódó számítások elvégzését megelőzően – a különböző teljesítményű, hagyományos, jellemzően polikristályos technológián alapuló napelemes rendszerek hazai beruházási költségeire alapozva, trendfüggvény felvételével – meghatároztam egy általános képletet, amely alapján rugalmasan kalkulálható az adott teljesítményű rendszer beruházási költsége:

$$y = - 23,51 x^2 + 330\,368 x + 1\,000\,000$$

ahol: y = a rendszer beruházási költsége (Ft), x = a rendszer beépített teljesítménye (kW_{el})

Az ismertetett képletben az x , vagyis a rendszer kW-ban kifejezett teljesítményének értelmezési tartománya: $10 \leq x \leq 5\,000$. A képlet számszakilag helyes eredményt meglátásom szerint a 10 kW_{el} és 5 MW_{el} napelemes rendszerek esetében ad. Az elvégzett gazdaságossági kalkulációkban egyik fontos tétel az inverter, mely nagyságrendileg a teljes rendszer átlagosan 20%-a. Amennyiben a napelemes rendszert a szennyvíziszapkomposzt alapú faapríték-termeléssel és faelgázosítóhoz kapcsolt CHP rendszerrel szeretnénk összehasonlítani, a 100 000 LEÉ méretű telep villamosenergia-önellátásából (kb. 63%) kiindulva a következő paraméterekkel rendelkező rendszerrel történhet a szükséges energiamennyiség (vagyis a fennmaradó mennyiség 37%-a: 1 048 ezer kWh/év) kiváltása (22. táblázat).

22. táblázat: A napelemes rendszer főbb paraméterei

Beépített teljesítmény (kW_{el}):	874
Beruházási költség egyenlete:	$y = - 23,51 x^2 + 330\,368 x + 1\,000\,000$
Rendszer beruházási költsége (millió Ft):	272
ebből: Inverter beruházási ktg (millió Ft):	40,7
Rendszer karbantartási költsége (Ft/ kW_{el} /év):	4 000
Inverter csere esedékessége:	15 év
Teljesítmény-csökkenés:	0,5%/év
Hasznos élettartam:	30 év

Forrás: saját számítás

A 100 000 LEÉ méretű telep teljes villamosenergia-önellátásának biztosításának érdekében megvalósított napelemes beruházás pénzforgalmát a III. számú melléklet, míg gazdaságossági mutatóit a 23. táblázat tartalmazza.

23. táblázat: Az energia-önellátáshoz szükséges napelemes rendszer gazdaságossági mutatói

Mutatók	15 éves időszak	30 éves időszak
Nettó jelenérték (NPV) (millió Ft):	17,7	182,9
Jövedelmezőségi index (PI):	1,07	1,75
Diszkontált megtérülési idő (DPP) (év):	13,5 év	13,5 év
Belső megtérülési ráta (IRR) (%):	10%	14%

Forrás: saját számítás

A táblázatban látható, hogy a jelenlegi energiaárak és alkalmazott diszkontláb mellett már 15 éves időintervallumban (a faapríték-termelés és -hasznosítás beruházás-elemzésének időintervalluma) megtérül a beruházás. Ily módon 13,5 éves megtérülési idő mellett 17,7 millió Ft lesz a beruházás nettó jelenértéke. Amennyiben a napelemek hasznos élettartamára vetítve – ekkor már a szükséges invertercserével is számolva – végezzük el a kalkulációkat, közel 183 millió Ft-os pozitív NPV adódik.

A 100 000 LEÉ terhelésű telep önellátását (vagyis a kogeneráció mellett a 37%-os villamosenergia-hiány fedezését) biztosító napelemes rendszer küszöbértékeire (zéró NPV) vonatkozóan a következő értékek jelölhetők meg:

- a kiváltott villamos áram árának 35%-os csökkenése, 19,72 Ft/kWh értékre
- a rendszer 67%-kal magasabb áron történő megvalósítása

Az egyes tényezők 10%-os változása esetén az NPV a következőképpen módosul:

- a kiváltott villamos áram árának (30,15 Ft/kWh) 10%-os csökkenése 29%-os csökkenést,
- a rendszer fajlagos beruházási költségének 10%-os emelkedése 15%-os csökkenést,
- a fajlagos energiatermelés 10%-os csökkenése 20%-os csökkenést okoz.

Élőgépes telep energia-igényének fedezése napelemekkel

Kalkulációim szerint egy 50 000 LEÉ méretű élőgépes telep esetében (a hazai élőgépes telepeknél átlagos értéként 0,55 kWh/m³ energiafogyasztást feltételezve) az éves energiaigényt (1 305 ezer kWh) egy közel 1 090 kW_{el} névleges teljesítményű, 332,4 millió Ft beruházási költségű napelemparkkal lehetne fedezni. A villamos energia kiváltásával, mint megtakarítás, valamint a kapcsolódó költségtényezők felhasználásával a megtérülési mutatók a következők (24. táblázat).

24. táblázat: Az 50.000 LEÉ energia-önellátásához szükséges napelemes rendszer gazdaságossági mutatói

Mutatók	15 éves időszak	30 éves időszak
Nettó jelenérték (NPV) (millió Ft):	27,7	228,8
Jövedelmezőségi index (PI):	1,09	1,77
Diszkontált megtérülési idő (DPP) (év):	13,3 év	13,3 év
Belső megtérülési ráta (IRR) (%):	10%	14%

Forrás: saját számítás

A napelemes rendszer előnyös megoldásként említhető meg, amennyiben a keletkező szennyvíziszap felhasználása, továbbfeldolgozása, így saját energiatermelés technológiai vagy jogszabályi korlátok miatt akadályba ütközik. Ilyenek lehetnek az 50 000 LEÉ, vagy az alatti kapacitású, ugyanakkor jelentős energiaigénnyel jellemezhető tisztítótelepek.

Egy 50 000 LEÉ kapacitású élőgépes tisztítótelepen a küszöbértékek a következőképpen alakulnak:

- a kiváltott villamos áram árának (30,15 Ft/kWh) 35%-os csökkenése, 20 Ft/kWh értékre
- a rendszer 65%-kal magasabb áron történő megvalósítása

Az egyes tényezők 10%-os változása esetén az NPV a következőképpen módosul:

- a kiváltott villamos áram árának (30,15 Ft/kWh) 10%-os csökkenése 29%-os csökkenést,
- a rendszer fajlagos beruházási költségének 10%-os emelkedése 15%-os csökkenést,
- a fajlagos energiatermelés 10%-os csökkenése 19%-os csökkenést okoz.

Amennyiben a szennyvíztelep energiaigényének fedezésére megvalósított napelemes rendszerrel a BAI et al. (2016) által vizsgált vízpermetes napelemes hűtés is kiépítésre kerülne, abban az esetben számításaim szerint kb. 2% többletenergia termelésére adódhat lehetőség éves szinten, amely a melegebb nyári napokon (elsősorban június-augusztus hónapokban) jelentkező cella-túlmelegedés megelőzéséből adódik. Megemlítendő ugyanakkor, hogy ez többlet beruházási és működtetési költségekkel is járna.

Az általam vizsgált feltételek alapján a szennyvíziszap-komposzt felhasználásával történő faapríték-termelés és energiatermelés gazdaságilag előnyösebb a napelemes rendszerrel, habár két egymástól jelentősen eltérő technológiai megoldásról beszélhetünk.

4.6. Tisztított víz és keletkező füstgáz felhasználása algás tavakban

Amennyiben a tisztított szennyvíz makro- és mikroelem-tartalmát tovább szeretnénk hasznosítani, valamint a biogáz égetése során keletkező füstgáz CO₂-tartalmára méretezzük az algatelepet, úgy BAI et al. (2017) számításait felhasználva, és az adott tisztító telepen jelentkező CO₂-emisszióval (1 255 t) kalkulálva, a következő paraméterekkel történhet az algatermesztés rendszerbe illesztése (25. táblázat):

25. táblázat: A kogenerációból származó füstgáz és tisztított víz algás hasznosítása

Megnevezés	M.e.:	Üvegház (félintenzív)	Mesterséges tó (extenzív)
Kogenerációs egység CO ₂ -kibocsátása	t CO ₂	1255	1255
Alga által megkötött CO ₂	t CO ₂	329	77
Technológia CO ₂ -emissziója	t CO ₂	52	12
CO ₂ -megtakarítás	t CO ₂	277	65
CO ₂ -kvóta értéke	EUR/t	22	22
CO ₂ megtakarítás értéke	ezer Ft	1 923	454
Szükséges algamennyiség	t	1 496	77
Algahozam	t/ha	248	19
Algató szükséges mérete (0,3 m mély)	ha	6	4
Szükséges beruházás	millió Ft	950	328
Olajtartalom	%	28	28
Kinyerhető olaj	t	419	22
Előállítható biodízel	ezer l	474	24
Helyettesített CO ₂	t	1 152	59
CO ₂ -emisszió a biodízelgyártás során	t	389	20
CO ₂ megtakarítás értéke	ezer Ft	5 285	273
Biodízel egységára	Ft/l	378	378
Biodízel értéke	millió Ft	179	9

Forrás: saját számítás BAI et al. (2017) alapján

Az igen jelentős beruházási költségek mellett a működési költségek szintje is magas, amely JUDD et al. (2017) alapján a nyílt (mesterséges tavas) rendszereknél eltérő, kb. 220-900 Ft/l előállítási költséget jelent. Ez literenként maximum 150-160 Ft-os profitot generál, amely optimális esetben is mindenképpen tíz éven felüli megtérülési időt eredményez. Az üvegház jellegű, félintenzív termesztéstechnológia esetében magasabb beruházási és működési költségekre, ugyanakkor nagyobb mennyiségű alga-előállításra lehet számítani. Az előzőeket tekintve elmondható, hogy bár a füstgáz algás hasznosításával a CO₂-megtakarítás mellett jelentős bevételekre adódhat lehetőség az előállított biodízel értékesítéséből, a kifejezetten magas beruházási költség, továbbá a betakarítási technológia kiforratlansága és a technológia érzékenysége miatt nem – vagy csak kellő mennyiségű tőke vagy állami támogatás

rendelkezésre állása esetén – javasolható. A szennyvíz tápanyag-, valamint a füstgáz CO₂-tartalmára alapozott algatermesztésnek tehát pozitív környezeti hatásai vannak, ugyanakkor amennyiben a versenyképességét csupán piaci alapon szeretnénk megítélni, a jelenleg legnagyobb mennyiségben felhasznált alapanyagokkal, mint a szója, a repce, a pálmaolaj, vagy éppen az elterjedőben lévő sósvízi algatermesztésre alapozott biodízel-gyártásnál akár 120-150 Ft/liter önköltség is elérhető (DEMIRBAS-DEMIRBAS, 2011; BAI, 2011; JOBBÁGY, 2013; NAGARAJAN, 2013).

4.7. Szennyvízhő hasznosítása a csatornában vagy a tisztítottvíz-kivezetőnél

A minimálisan szükséges 3 400 m³/nap szennyvízhozam figyelembe vételével becslésem szerint – amennyiben a teljes szennyvízmennyiségből lehetséges lenne a hőcserélés – a telep előtti szakaszon a főgyűjtő közelében már egy 25 000-30 000 LEÉ méretű – kisváros vagy ipari, mezőgazdasági üzem szennyvizére alapozott – telepen is elegendő szennyvíz keletkezhet a szennyvízhő hasznosításának céljából.

A szakmai konzultációk tapasztalatai alapján viszont az a meglátásom, hogy a szennyvízhő hasznosítása elsődlegesen a nagyobb – négy-ötszázezer LEÉ méretnél, vagy az attól nagyobb tisztító telepeken történhet fenntartható módon, a hatékony és gazdaságos tisztítási tevékenység veszélyeztetése nélkül. Ennek fő oka, hogy a téli időszakban a beáramló szennyvíz hőmérséklete – a csatornahálózat hosszától is függően – a hőtartalom hőszivattyús kivonása által a kritikusnak számító 12 °C alá csökkenhet, ami a technológia hatékony működtetésének alsó határa. Ily módon, a kisebb telepeken a szennyvízcsatornából történő hő-kivétel helyett a szennyvíztisztító telepről elfolyó tisztított vízből való hőkinyerést tartom megvalósíthatónak. A szennyvízhő-hasznosítás egy másik korlátja lehet, hogy a telepről elfolyó víz hőtartalmának hasznosítása esetén távol vannak a – nagyobb fűtési/hűtési hő igénylő – közintézmények és irodaépületek, emellett a telepi hőenergia-igény a biogáz hasznosítása során is biztonságosan fedezhető. Megfontolható lehet ugyanakkor a távhőrendszerben való hasznosítás, amennyiben már ki van építve. Hozzá kell tenni azt is, hogy minél távolabb helyezkedik el az adott felhasználó (épület) a főgyűjtőtől, annál kedvezőtlenebbek a lehetőségek e célból, továbbá a szennyvíznek csak bizonyos részét van mód hőcserélésre használni annak érdekében, hogy a telepen a hatékony tisztítási tevékenységhez szükséges hőmérséklet biztosítva legyen.

4.8. A telepméret befolyásoló hatása az energia-önellátás megvalósítására

Számításaim alapján azokon a hagyományos eleveniszapos telepeken, melyek elérik a rothasztás gazdaságos megvalósíthatóságának (kb. 50 000 LEÉ kapacitás) határát és

kogenerációs technológiát alkalmaznak, az energetikai önellátás mutatóira a telepméret jelentős befolyásoló hatással bír (26. táblázat).

26. táblázat: A kommunális tisztító telep kapacitása és az energia-önellátás számított mutatói

Telep terhelése	50 000 LEÉ	100 000 LEÉ	200 000 LEÉ	300 000 LEÉ	400 000 LEÉ	500 000 LEÉ
Elektromos energia önellátás mértéke	53%	63%	74%	82%	87%	92%
Hőenergia önellátás mértéke	90%	106%	125%	138%	148%	156%

Forrás: saját számítás

A fentieket természetesen befolyásolhatja az elavult technológia vagy egyéb – az adott telepekre vonatkozó – módosító tényezők és adottságok. Kalkulációm alapján átlagtechnológia megvalósítása esetén (külön hozamfokozó hatás érvényesítése nélkül) az üzemméret méretgazdaságossága alapján elméletileg egy 700 000 LEÉ kapacitású telepen már megvalósítható a 100%-os villamosenergia-önellátás. A telepen kívüli (csatornahálózat, szennyvíz-átemelők és szivattyúk) energiafelhasználásával számításaimban nem kalkuláltam.

Összességében elmondható, hogy – a méretgazdaságosság elvével összefüggésben – az alap- és kiegészítő technológiák esetében mind a fajlagos energiafelhasználás, mind a különböző berendezések beruházási ára és hatásfoka természetesen annál kedvezőbb, minél nagyobb a kapacitás.

4.9. Rendszerszintű hatások az energia-, tápanyag- és CO₂-gazdálkodás terén

A 27. táblázatban egy egységméretű (100 000 LEÉ kapacitású), hagyományos eleveniszapos technológiát alkalmazó kommunális tisztítótelepre és a 8. ábrán is bemutatott kiegészítő technológiai elemekre vonatkozóan foglaltam össze az energia-, tápanyag- és CO₂-gazdálkodás terén adódó lehetőségeket.

Az egységméret választásának oka, hogy hazánkban a hasonló (100 000 LEÉ és attól nagyobb) kapacitású telepek felelősek a keletkező szennyvíz döntő hányadának tisztításáért, emellett méretükből kifolyólag gazdaságosan megvalósítható a szennyvíziszap-rothasztás.

27. táblázat: Egy 100.000 LEÉ terhelésű tisztító telep lehetőségei az energia-, tápanyag- és CO₂-gazdálkodás terén (egy évre vetítve)

Kiegészítő eljárás/termék megnevezése	Megtakarítási, bevételi lehetőségek											
	Energia						Tápanyag				Károsanyag (CO ₂) megtakarítás	
	Villamos energia (ezer kWh)	Érték (ezer Ft)	Hő-energia (ezer MJ)	Érték (ezer Ft)	Hajtóanyag (t)	Érték (ezer Ft)	Nitrogén		Foszfor		Menny. (t)	Érték (ezer Ft)
							Menny. (t hatóá.)	Érték (ezer Ft)	Menny. (t hatóá.)	Érték (ezer Ft)		
Bemenő szennyvíz tápanyagtartalma							475	102 490	73	24 768		
Kimenő szennyvíz tápanyagtartalma							71	15 373	5	1 610		
BIOGÁZ HASZNOSÍTÁSA												
Kogenerációs energiatermelés biogázból	1 766	53 224	7 151	19 300							1 789	12 394
Biogáz tisztítása és biometán-értékesítés vagy felhasználás:												
- Földgázhálózatba táplálás esetén VAGY			14 119	38 107							1 070	7 417
- Hajtóanyagként történő értékesítés esetén					324	114 274					891	6 173
ISZAPKOMPOSZT ÉS FAAPRÍTÉK HASZNOSÍTÁSA												
- N és P műtrágya előállítás/kiváltása											281	1 945
Energiaültetvényen történő komposzt-hasznosítás és faapríték-termelés	-316						24	5 273	12	3 944	-223	-1 545
Megtermelt biomassza felhasználása gázosító műben és CHP-ben, majd energia-önellátás és a többletenergia értékesítése	2 738	86 654	16446	44 387							3 179	22 032
NAPELEMES ENERGIATERMELÉS												
Napelemes energiatermelés és szennyvíztelepi alkalmazhatósága	1 048										740	5 129

Forrás: saját számítás

A táblázatban megfigyelhető, hogy amennyiben a kogenerációs energiatermelést és a biometán-tisztítást (földgáz-hálózatba táplálás vagy pedig hajtóanyagként történő értékesítés) hasonlítjuk össze, CO₂-megtakarítás szempontjából is előbbi az előnyösebb, 1 789 tonnás éves mennyiséggel. Ezt követi a földgáz-hálózatba táplálás, majd pedig a hajtóanyagként történő értékesítés. A nitrogén és foszfor műtrágyák kiváltása éves szinten 281 t CO₂-megtakarítást eredményez. A CO₂-megtakarítást csökkenti a komposzt szállítása során kibocsátott károsanyag-mennyiség (az energiaültetvényen történő komposzt-hasznosításnál figyelembe véve), ugyanakkor a mesterséges úton előállított műtrágyáknak a gyártóüzemből a telepre szállítása nehezen becsülhető. Ha ezt is számszerűsítanánk, további megtakarítás adódna. A faapríték-termelés egyes munkaműveleteinek CO₂-kibocsátási mennyisége számításaim alapján alig valamivel több, mint 7%-a a faapríték hasznosításából (és fosszilis energiahordozó kiváltásából) adódó CO₂-megtakarításnak. A villamosáram-önellátás érdekében megvalósítható napelemes rendszer CO₂-kiváltása 740 tonna/év.

Mindezek alapján becslésem szerint – felhasználva a fentiekben megjelölt információkat, valamint figyelembe véve a méretezési sajátosságokat az anaerob rothasztást alkalmazó 18 db szennyvíztisztító telepen – a magyarországi szennyvíztisztító telepek nagyságrendileg az alábbi mennyiségű CO₂-mennyiséget takaríthatnák meg (28. táblázat).

28. táblázat: A kogenerációval és energianövényes energiatermeléssel megtakarítható CO₂ a jelenleg iszaprothasztást alkalmazó telepeken

Technológiai elem	Kogeneráció	Energianövény-termesztés és gázosító + CHP energiatermelés	Összesen
Megtakarított CO₂ mennyisége (ezer t/év)	69,2	124,0	193,2
Érték (millió Ft/év)	479,6	859,4	1 339,1

Forrás: saját szerkesztés

Ha a további nyolc 100 000 LEÉ feletti, valamint a tizennégy 50 000-100 000 LEÉ közötti telepen is megvalósításra kerülne anaerob rothasztás (és akár hozzá kapcsolódó energianövényes energiatermelés), abban az esetben további jelentős megtakarításra nyílhatna lehetőség.

Habár – elsődlegesen a fosszilis energiahordozók egyeduralmából következően – az éves összes hazai bruttó, valamint szektorok szerinti CO₂-kibocsátási értékekkel (KSH, 2019c) összevetve a szennyvíztelepeken elérhető megtakarítás nem mondható jelentős mértékűnek, hatása azonban nem elhanyagolható (29. táblázat).

29. táblázat: A kogenerációs, valamint a komposzthasznosítással egybekötött faaprítéktermelés és -felhasználás CO₂-megtakarítás jelentősége a hazai bruttó éves CO₂-kibocsátásban

Szektor megnevezése	CO ₂ kibocsátás			
	Összesen	Háztartások	Energiaipar	Ipar
Ezer t CO ₂	47 578	7 413	13 490	9 181
Telepek CO₂-megtakarításának aránya az adott szektorhoz képest	0,41%	2,61%	1,43%	2,10%

Forrás: saját számítás

Amennyiben a faapríték alapú energiatermeléssel kiváltott fosszilis energiahordozók CO₂-kibocsátásának megtakarításától eltekintünk, abban az esetben a százalékos értékek a fentieknek kb. egyharmadára csökkennek. Az előnyök és lehetséges pozitív hatások értékelésénél a CO₂-megtakarítás lehetősége mellett természetesen a korábbiakban ismertetett költségmegtakarító vagy bevételnövelő tényezőket is mindenképpen szükséges figyelembe venni.

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Következtetéseimet és javaslataimat a „Témafelvetés, célkitűzések” fejezetben meghatározott célkitűzésrendszerhez igazodóan és azok sorrendjében ismertetem.

1. Milyen lehetőségek állnak rendelkezésre a hagyományos eleveniszapos technológián alapuló, továbbá az élőgépes és a természetközeli tisztító technológiák esetében energetikai önellátás részleges/teljes megvalósítása vagy piacképes termék-előállítás céljából, kapcsolódva a körforgásos gazdaság koncepciójához? Milyen hatással van az üzemméret és a technológia a vizsgált témakörökre?

Kutatómunkám során áttekinttem a legszélesebb körben elterjedt eleveniszapos technológia, az élőgépes technológia és a természetközeli (elsődlegesen gyökérszűrés) technológiák jellemzőit és azonosítottam azok korlátait. Mindezek alapján megállapítottam, hogy a technológiák sajátosságából adódóan az általam vizsgált kiegészítő megoldások az eleveniszapos technológiához illeszthetők legnagyobb mértékben. Ebben alapvető befolyásoló szerepe van a telepméretnek. Kijelenthető, hogy a tisztítótelep mérete – a méretgazdaságosság elvének megfelelően – alapvetően befolyásolja az energia- és tápanyag-gazdálkodási lehetőségeket, továbbá a fajlagos beruházási és működési költségeket, így a gazdaságosságot is. A kisebb (kb. 50 000 LEÉ kapacitás alatti) telepeken részben a csekély keletkező iszapmennyiség, részben az előállított komposztra vonatkozó szigorú előírások miatt gazdaságtalan, illetve problémás az energetikai vagy tápanyag-gazdálkodási célból történő hasznosítást lehetővé tevő megoldások alkalmazása. A tisztítás hatásfokával kapcsolatban megemlíthető, hogy a kisebb (10 000 LEÉ alatti kapacitású) telepeknek a 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet alapján az összes foszforra és összes nitrogénre vonatkoztatva sincs kibocsátási határérték megszabva. Ez lehetővé teszi ezek működését, ugyanakkor környezeti szempontból kockázatokat rejt magában.

A vizsgált kiegészítő lehetőségeket tekintve a következő kritériumok jelölhetők meg:

- Szennyvíziszap-rothasztás és kogeneráció vagy biometán-előállítás és -felhasználás: alsó mérethatára a negyven-ötvenezer LEÉ méretű telepek. A kogenerációs energiatermeléssel 60% körüli villamosenergia-, míg 100% körüli hőenergia-önellátás érhető el egy 100 000 LEÉ kapacitású telepen. Ettől nagyobb telepméret esetén a mutatók még kedvezőbbek (300 000 LEÉ-nél 82% és 138%, 500 000 LEÉ-nél 92%, ill. 156%). A biogáz tisztítása, majd biometán előállítása és felhasználása a jelenlegi gazdasági környezetben, abban az esetben indokolható, ha az energetikai önellátás

megvalósításra került és/vagy nem biztosított a keletkező hulladékhő hasznosítása, értékesítése.

- Szennyvíziszapkomposzt-hasznosítás és tápanyag-gazdálkodás: Az átlagos minőségű szennyvíziszap-komposzt felhasználásával jelentős mennyiségű nitrogén és foszforműtrágya (valamint ezek előállításához szükséges CO₂-mennyiség) váltható ki. Alkalmazását elsődlegesen a nem élelmiszercélú növénytermesztésben, energetikai ültetvényeken javaslom. Az anaerob technológia megléte kedvezően hat a szennyvíziszap minőségére a hőkezelés miatt, amely ezáltal könnyíti, illetve gyorsíthatja a biztonságos felhasználást.
- Energiaültetvényes biomassza-termelés és hasznosítás: a fás szárú energiaültetvények hozamát kedvezően befolyásolja a szennyvíziszap-komposzt kijuttatása, emellett az energiaültetvények hozzájárulnak a nehézfém-szennyezett talajok tisztításához is. A biomassza felhasználásával megtermelt energia hozzájárulhat a tisztítótelep energia-önellátásához, illetve többletenergia értékesítéséhez is. Energia-önellátás céljából a vizsgált módszerek közül legkedvezőbb megoldás a CHP egységgel felszerelt faelgázosító berendezés telepítése.
- Napelemes energiatermelés: az iszaprohasztás gazdaságos megvalósításának mérethatárát el nem érő telepek, vagy a szennyvíziszap komposztként történő felhasználásának akadályoztatása esetén kedvező megoldás lehet a napenergia-alapú villamosenergia-önellátás megvalósítása.
- Tisztított szennyvíz és füstgáz CO₂-tartalmának hasznosítása algás tavakban: a füstgáz hasznosítása céljából hatékony megoldás lehet az algás hasznosítás (kiváltképp a félintenzív vagy intenzív technológiák), amely ugyanakkor jelentős tőkeigénnyel jellemezhető. Az algatermesztés alkalmazása kizárólag a nagyobb tisztítókapacitású telepeken indokolható, jelenleg más algatermesztési módokkal nem versenyképes.
- Szennyvízhő hasznosítása: elsődlegesen a nagyobb – négy-ötszázezer LEÉ méretnél, vagy az attól nagyobb tisztító telepeken történhet fenntartható módon, a hatékony és gazdaságos tisztítási tevékenység (vagyis a szükséges szennyvízhőmérséklet fenntartásának) veszélyeztetése nélkül. Hazánkban csak a fővárosban van ilyenre példa.

A kogenerációs energiatermelés során termelt hulladékhő hasznosítása, esetleg a termelt biometán hasznosítása, valamint a hőszivattyús hőkinyerés esetében hasonló rendszerek gazdaságos üzemeltetése elsődlegesen város vagy ipartelep közelségében biztosítható.

H1 – A hagyományos technológiájú szennyvíztisztító telepek gazdaságos működése jellemzően nagyvárosi környezetben, illetve méretekben képzelhető el a teljeskörű termékhasznosítás és a méretgazdaságosság miatt. Továbbá ezeken a telepeken legkedvezőbbek a lehetőségek az energia-tápanyag-károsanyag hármast tekintve. **Igazoltam.**

2. Milyen előnyei és hátrányai, valamint környezeti és gazdasági sajátosságai vannak az egyes kiegészítő technológiáknak és eljárásoknak a szennyvíz-gazdálkodásban energetikai, tápanyag-gazdálkodási és károsanyag-kibocsátási szempontból?

A gazdaságossági sajátosságok meghatározásán keresztül módomban volt számszerűsíteni a kiegészítő technológiák gazdasági fenntarthatóságához való hozzájárulását. Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy – habár a szennyvíztelepek és csatornarendszer a közjavak csoportjába tartoznak – az általam elvégzett elemzésben az externális hatások számszerűsítésétől – a kapcsolódó módszertanok becslési bizonytalanságainak ismeretében – eltekintettem. Az előzőekből is kifolyólag a jelenlegi gazdasági környezetben az externális hatások nincsenek kellő mértékben figyelembe véve. Az egyes kiegészítő eljárások sajátosságait és gazdaságossági részleteit a korábban ismertetett sorrendben fejtem ki az alábbiakban.

- Szennyvíziszap-rothasztás és kogeneráció vagy biometán-előállítás és felhasználás: A kogenerációs energiatermelés, valamint a biometán-tisztítás és -hasznosítás hazánkban egymást kizáró technológiai lehetőségek. Előbbi alacsonyabb beruházási költséggel (az egységmértékű telepre vetítve 81,3 M Ft a kogenerációs egység) éves szinten 27,7 M Ft profitot képes termelni, míg a biogáz-tisztító berendezés töltőállomással 235 M Ft, anélkül 204 M Ft befektetési költség mellett éves szinten hajtóanyagként értékesítve 61,8 M Ft profitot, földgázhálózatba táplálva 7,6 M Ft veszteséget termel. A CO₂-kibocsátás-megtakarítást tekintve a kogenerációs energiatermelés a legelőnyösebb megoldás, 1 790 t CO₂/év mennyiséggel (12,4 M Ft értékkel).
- Szennyvíziszapkomposzt-hasznosítás és tápanyag-gazdálkodás: A fermentált iszap komposztálásával jelentős mennyiségű tápanyag válik felhasználhatóvá. Ennek mennyisége egy 100 000 LEÉ telep esetében éves szinten 24 t nitrogén, illetve 12 t foszfor hatóanyag (5,3 M Ft/év és 3,9 M Ft/év értékkel). Az így kiváltott műtrágya előállítás CO₂-kibocsátásának értéke 1,9 M Ft/év.
- Energiaültetvényes biomassza-termelés és hasznosítás: Az energetikai ültetvények a kedvezőtlen adottságú területeken is kedvező hozam produkálására képesek gyors növekedésüknek köszönhetően, emellett akár jelentős mértékben csökkenthetik a talaj

nehézfém-tartalmát. A keletkező – kétéves vágásforduló esetén hektáronként az ültetvény életkorától függően 16 – 24 a.t. – biomassza faelgázosítóhoz vagy pirolízis műhöz kapcsolt kogenerációs erőművel az energia-önellátás, valamint többlet villamos- és hőenergia értékesítése által járulhat hozzá a szennyvízgyártás gazdaságosságának javításához. Az ültetvény NPV-je a teljes életciklusra (15 év) vetítve kéthektáros területen 754 ezer Ft, 24%-os belső megtérülési rátával. Az ültetvény energiamérlege a szállítási távolság (10 – 40 km) függvényében 1:36 – 1:21. 30 km-es szállítási távolság esetén az NPV már a negatív tartományba esik. Számításaim szerint a 100 000 LEÉ méretű telepen a teljes energiaönellátás megvalósításához (a kogenerációt kiegészítve) 92 hektáros területre lenne szükség. Az ehhez szükséges faelgázosító+CHP rendszer 7 év alatt térülhet meg. Amennyiben az összes szennyvíziszap komposztálásra kerülne, a maximálisan kijuttatható hatóanyag-mennyiséggel (nitrátérzékeny területen 170 kg N hatóanyag/év/ha) kalkulálva 290 hektáros területre lenne szükség. Az erre méretezett 360 kW_{el} teljesítményű CHP egység, és az azt kiszolgáló faelgázosító kazán megtérülési ideje 7,4 év, 19%-os belső megtérülési rátával. A gazdaságos működtetés saroktényezőjét a biogázra, valamint a faelgázosításra alapozott kogenerációs energiatermelés esetén is a megtermelt energia mintegy 55-60%-át kitevő hulladékhő hasznosítása jelenti. A hulladékhő hatékony és teljes körű felhasználását nehezíti, hogy a nyári időszakban nemcsak a telepi hőenergia-önfogyasztás csökken, hanem a termelődött biogáz mennyisége is nagyobb a téli félévhez képest, így meglehetősen problematikus a folyamatos és teljes körű hőhasznosítás megtervezése. Ehhez természetesen hozzájárul az is, hogy a nyári időszakban a lakossági hőigény is lecsökken. Ebben az időszakban lehetőségként vehető fel az iszapszárítás vagy termelő üzemek technológiai hőigényének kielégítése, továbbá a távhűtésben való hasznosítás. A pirolízis technológiájának alkalmazása megoldás lehet a termelt hulladékhő - elsősorban nyári időszakban történő - hasznosításának nehézségeire, ugyanakkor fűtőanyagként történő felhasználása mellett számos egyéb alternatíva említhető. Ezen eljárások természetesen további feldolgozási, finomítási költséget vonnak maguk után.

A jelentős tőkeigény, a komoly logisztikai kihívások, valamint az üzembiztonság miatt célszerűnek tartanám először a kisebb, energia-önellátásra méretezett rendszer kiépítését. A rendszer kapacitása ezt követően bővíthető, és ezzel párhuzamosan az energiaültetvényeken megtermelt biomassza mennyisége is nő az ültetvények életkorából kifolyólag. Több egymást követő évben történő ültetvény-telepítés

egyszerűbben kivitelezhető (tőkeigénye eloszlik), amely hozzájárul a megtermelt faapríték mennyiségi ingadozásának csökkentéséhez is.

- Napelemes energiatermelés: Az egység méretű telepre vetítve, a kogenerációs energiatermelést kiegészítve, a teljes villamosenergia-önellátás egy kb. 870 kW_{el} rendszerrel valósítható meg. Számításaim szerint a beruházás 13,5 év alatt térül meg (17,7 M Ft NPV). Amennyiben viszont a napelemek hasznos élettartamára vonatkozóan végezzük el a beruházás-elemzést, úgy 183 M Ft-os pozitív NPV adódik. Egy 50 000 LEÉ méretű telepen – ahol a feltételezés szerint nem került kialakításra anaerob rothasztásra alapozott kogenerációs energiatermelés – 332 M Ft-os beruházási költség mellett 13,3 éves megtérülési idő, és 229 M Ft-os NPV adódik, a beruházás-elemzést 30 évre elvégezve. A napelemes energiatermelés esetében – több okból kifolyólag – mindenképpen a szinkron üzemmód javasolható: (1) a szennyvíztelepek eredetileg csatlakoztatva vannak a közcélú elektromos hálózathoz; (2) a napelemes rendszerrel megtermelt energia nem csak a felhasználás idejében áll rendelkezésre; továbbá (3) így elkerülhető a jelentős költség-igényű akkumulátorok beruházása is.
- Tisztított szennyvíz és füstgáz CO₂-tartalmának hasznosítása algás tavakban: A füstgáz CO₂-tartalmára méretezve az algás hasznosítást, félintenzív üvegház esetében 6 hektár, extenzív mesterséges tónál pedig 4 hektár területre lenne szükség. A beruházás értéke igen jelentős: 950 M Ft, illetve 328 M Ft. Ezzel együtt a CO₂-kiváltás, valamint az alga hasznosításával előállítható biodízel értéke éves szinten összesen 179 M Ft, illetve 9 M Ft. Így az algatermesztést csak jelentős állami támogatás igénybe vételének lehetősége mellett javaslom.
- Szennyvízhő hasznosítása: Megfelelő (nagyvárosi) környezetben, illetve szennyvízhozam mellett – a vonatkozó szakirodalmi források és elemzések alapján – kiépítése esetén megtérülési ideje igen kedvező (új építés esetén akár 3-4 év), köszönhetően kedvező COP-értékének. A sokszázézes vagy akár milliós nagyságrendi kapacitású telepeken igen kedvező gazdaságosság és CO₂-megtakarítás érhető el, hazánkban azonban csak a fővárosban található ilyen rendszer. Emellett elmondható, hogy a hőszivattyús rendszerek nem a telepi energia-önellátáshoz, hanem a vezetékrendszer vonalán lévő irodaházak vagy üzemek fűtési és használati melegvíz-ellátását hivatottak biztosítani.

A felépített rendszerben megjelenő körfolyamatban egyértelműen érvényesülnek a körforgásos gazdaság alapelemei (3R: reduce, reuse és recycle – csökkentés, újrafelhasználás és reciklálás),

emellett megvalósul a veszteségek minimalizálásának elvárása is: a rendszerből a tisztított vízben kívül az esetlegesen túlzott nehézfém-tartalmú fahamu, a CO₂ algás tavak által nem felhasznált része, valamint az előállított (energia-önellátás igényét meghaladó mennyiségű) villamos- és hőenergia, vagy egyéb (energiacélú) termék távozik. Ezek alapján elmondható, hogy minimális mennyiségű hulladék termelődik a körfolyamatok kihasználása által.

H2 – A szennyvíztisztítási tevékenység gazdasági és környezeti fenntarthatósága jelentős mértékben javítható – üzemmérettől függően különböző – kiegészítő technológiák rendszerbe integrálásával, és ezek lehetővé teszik a körforgásos gazdaság koncepciójának megvalósítását.

Igazoltam.

3. Milyen potenciál rejlik országos szinten a feltérképezett kiegészítő eljárásokban az energia-tápanyag-károsanyag hármast tekintve?

A szennyvíztisztításra – mint kötelezően elvégzendő feladatra – és az annak során keletkező melléktermékekre számos kiegészítő eljárás alapozható. Mindezek egyértelműen hozzájárulhatnak az aktuális nemzeti célkitűzésekhez a megújuló energetika, a CO₂-kibocsátás-csökkentés, valamint a fenntartható tápanyag-gazdálkodás terén.

Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Tervében – az EU 13%-os elvárását is meghaladó mértékű – 14,65%-os célérték került kitűzésre 2020-ra a megújuló energiaforrások részarányát illetően a bruttó energiafelhasználásban. Bár a célértéket a hazai háztartások fűtési célú energiafelhasználásának egy uniós rendelet (Európai Bizottság 431/2014) miatt történő újraszámítását követően 2017-ben már közel elértük (10,3%-ról 14,5%-ra ugrott az érték), ez a tapasztalatok szerint bizonyos mértékben vissza is vetette a megújulás beruházásokra irányuló pályázati kiírások számát. Mivel az EU-s „Tiszta energia csomag” alapján 2030-ra már a teljes energiafogyasztás 32%-át megújuló energiaforrásból kell majd fedezni EU-s szinten, így az egyes tagállamoknak is szükséges lesz tovább növelniük a megújuló alapú energiatermelést 2020-at követően is. Ehhez meglátásom szerint hozzájárulhatnak a dolgozatomban ismertetett, szennyvíztelepekhez kapcsolódó kiegészítő eljárások is. Számításaim szerint a szennyvíztisztításhoz kapcsolt kogenerációs energiatermelés és -felhasználás országos szinten évente 85 millió kWh villamos energiának, valamint 344 TJ hőenergiának megfelelő energiamennyiséggel járulhat hozzá a megújulóenergia-termeléshez, míg a szennyvíziszap-komposzttal trágyázott energetikai ültetvényeken termelt faapríték felhasználásával ez 132 millió kWh és 792 TJ. Ezáltal a kogenerációs energiatermelés 0,27%-kal, az energiaültetvényes energiatermelés pedig további 0,41%-kal növelné a megújuló alapú

villamosenergia-termelést. A hőenergiát is hozzávéve az országos primer energiafelhasználás mennyiségéhez (ami 1,081 millió TJ) összesen 0,18%-kal (kb. 1 920 TJ) járulhat hozzá az országos megújuló energetikai célkitűzésekhez.

A CO₂-kibocsátás csökkentésében a kvótarendszer kibővítése tervben van a jövőre vonatkozóan. A szennyvíz-gazdálkodás terén elérhető károsanyagkibocsátás-csökkentés számszerűsítése céljából meghatároztam ennek mennyiségét és értékét is. A 18 db hazai telepre vetítve a kogenerációs energiatermelés 69,2 ezer t (480 millió Ft/év), míg az energiaültetvényes faapríték-termelés és felhasználás rendszerbe integrálása 124 ezer t CO₂ (860 millió Ft/év) kibocsátás megtakarítást eredményezhet. Ez az országos bruttó széndioxid-kibocsátás 0,41%-ának megfelelő mennyiség.

A tápanyag-gazdálkodásban a szennyvíziszap-komposzt kihelyezéssel 1 175 t N és 560 t P₂O₅ hatóanyag takarítható meg, 254 millió Ft és 190 millió Ft értékben, míg a tisztított vízben lévő mennyiség 3 430 t N (740 millió Ft/év) és 228 t P₂O₅ (77,5 millió Ft/év). Utóbbi hasznosítására kínálhat lehetőséget az algatermesztés, kedvező (70-90%-os) makroelem-hasznosítási hatásokkal.

A fentiekre tekintettel kijelenthető, hogy a szennyvíztisztításhoz kapcsolt energetikai és tápanyag-gazdálkodási megoldások a körfolyamatokban rejlő lehetőségek kiaknázásával hozzájárulhatnak mind a megújuló energiaforrásból előállított energia arányának növeléséhez, mind az energia-importfüggőség (~56%) csökkentéséhez, továbbá a károsanyag-kibocsátási célok eléréséhez is.

H3 – A kiegészítő technológiák közép- és hosszú távon hozzájárulnak az országos klímavédelmi törekvésekhez és a gazdasági fenntarthatósághoz is. **Igazoltam.**

4. Milyen feltételek mellett ártalmatlanítható a legnagyobb arányban alkalmazott eleveniszapos technológiájú telepeken keletkező szennyvíziszap, a lehető legteljesebb mértékben hozzájárulva a fenntarthatósági törekvésekhez?

A szennyvíztelepeken egyre nagyobb mennyiségben keletkező szennyvíziszapok hasznosításának céljából kalkulációkat végeztem a víztelenített iszap komposztálására, valamint fás szárú energetikai ültetvényekre történő kihelyezésének tervezésére irányulóan. A feldolgozott külföldi és hazai szakirodalom alapján a szennyvíziszap-komposzt kedvező hatással van a talajéletre, és megfelelő dózisban történő alkalmazása a talaj makroelem-tartalmának megőrzése mellett jelentős biomasszahozam-növekedést is eredményez. A fás szárú energiaültetvényeknek pedig – közel egész éves talajfedést biztosítva – talajvédő hatásuk

van, emellett eredményesen természetők a kedvezőtlen adottságú területeken is. Ez hozzájárul az élelmiszer-energia ellentmondás feloldásához is. Számításaim szerint egy 100 000 LEÉ méretű telepnél összesen kb. 290 ha energiaültetvényen lenne lehetőség az összes keletkező szennyvíziszap elhelyezésére. Amennyiben az összes 100 000 LEÉ kapacitás feletti, rothasztást is alkalmazó (18 db, 4 815 000 LEÉ összkapacitású) tisztítótelepen megoldható lenne a komposztálás és energiaültetvényes hasznosítás rendszerbe illesztése, úgy a szennyvíziszap-komposzt hasznosítására (lehetőleg két vagy több egymást követő évben történő telepítéssel) összesen nagyságrendileg 14 ezer ha energiaültetvényre lenne szükség. Erre – a vonatkozó előírások betartása mellett – alkalmasak lehetnek az erózióra és deflációra hajlamos (házánk szántóterületének kb. 60%-a), illetve kedvezőtlen adottságú területek (összesen 883 558 ha, azaz Magyarország összterületének 9,5%-a, a teljes megművelt terület 14%-a). Primer és szekunder adatgyűjtésemre alapozott kalkulációim alapján – összefüggésben a Szennyvíziszap Hasznosítási Stratégiában megfogalmazottakkal – meglátásom szerint a keletkező szennyvíziszap komposztálása a leginkább előnyös megoldás, melynek energetikai ültetvényeken történő felhasználásával számos kedvező hatás érvényesülhet. A megvalósíthatóság szempontjából azonban korlátozó tényező lehet az esetleges túlzott nehézfém-akkumuláció a fák gyökérrendszerében, vagy pedig az adott tisztító telep esetében rendelkezésre álló – optimális szállítási távolságon belül lévő – területek rendelkezésre állása. Utóbbival kapcsolatosan megemlíthető a tisztító telepek városszéli elhelyezkedése.

H4 – A szennyvíziszap-hasznosítás és ezzel egyidejűleg az energetikai önellátás leghatékonyabban fás szárú energetikai ültetvényekkel oldható meg. **Részben igazoltam.**

6. AZ ÉRTEKEZÉS FONTOSABB MEGÁLLAPÍTÁSAI, ÚJ ILLETVE ÚJSZERŰ EREDMÉNYEI

A szennyvíztisztítási tevékenység alaptermékjeinek, valamint egyes kiegészítő lehetőségeinek feltérképezését követően meghatároztam, hogy az egyes alaptermékjeihez – a telep méret figyelembe vételével – mely kiegészítő elemek kapcsolódhatnak. A szennyvíztelepi energia-önellátás és bevétel-maximalizálás, valamint a hulladéktermelés minimalizálása céljából felvázoltam egy koncepciót, amely a körforgásos gazdaság elvén a lehető legteljesebb mértékben hasznosítja a telepre érkező hulladék/melléktermék energia- és tápanyagtartalmát. Kutatásaim során hasonló – a szennyvíztelepet, mint tisztítóegységet, egyben nyersanyag-lelőhelyet középpontba állító – koncepció meglétéről és hasonló, többszempon t u vizsgálata ról nem értesültem. A körfolyamat felépítését követően megvizsgáltam, hogy energia-, tápanyag- és szén-dioxid-gazdálkodás szempontjából az egyes elemeknek milyen jellemzőik, sajátosságaik vannak. Ezek alapján újszerű eredményeim a következőkben foglalhatók össze.

1. Azonosítottam a felépített rendszer jellemzőit és lehetőségeit a körforgásos gazdaság alapelemeivel (3R: reduce, reuse és recycle – csökkentés, újrafelhasználás és reciklálás) összefüggésben. Ez alapján a rendszerből a tisztított vízen kívül fahamu, a CO₂ fel nem használt része, valamint az előállított (energia-önellátás igényét meghaladó mennyiségű) villamos- és hőenergia, vagy egyéb (energiacélú) termék hagyja el. Ezáltal a rendszer hozzájárul a veszteségek és a környezetszennyezés minimalizálásához is.
2. Igazoltam, hogy a megvizsgált energiatermelési és tápanyag-hasznosítási lehetőségek megvalósíthatósága és gazdaságossága szempontjából az üzemméret döntő fontosságú. Az algás hasznosítást magas tőkeigénye és a termesztéstechnológia érzékenysége miatt nem tartom célszerűnek. Teljes energia-önellátás céljából a komposzttal trágyázott energiaültetvényeken előállított biomassza alapú energiatermelés alternatívája lehet a napelemes energiatermelés, amennyiben nem megoldható a szennyvíziszap mezőgazdasági hasznosítása. Ezen rendszerek megtérülése jóval kedvezőbb a vásárolt villamos áramhoz képest, tehát megfelelő feltételek mellett célszerű ezzel kiegészíteni az alaptermékjeit.

3. Meghatároztam egy képletet a telepmérettől függő fajlagos energiafelhasználás becslésére – a magyarországi üzemek jellemzői alapján – amely a telepméret függvényében kalkulálja a villamos- és hőenergia-felhasználást:

$$y = 1,909x^{-0,24}$$

ahol: y = telep fajlagos energiafogyasztása (kWh/m³), x = a szennyvíztelep kapacitása (100 m³ szennyvíz/nap mennyiségben)

Ilyen módon lehetőségem nyílt megbecsülni a kogenerációs energiatermelés és energia-önellátás mértékét különböző kapacitású telepekre vonatkozóan. Ez alapján egy 100 000 LEÉ egységmértű eleveniszapos telep esetében 63%-os villamos-, valamint 106%-os hőenergia-önellátást kalkuláltam.

4. Igazoltam, hogy gazdaságilag és környezetileg (ÜHG-kibocsátás) is a kogenerációs energiatermelés a leginkább előnyös megoldás (a termelt hulladékhő teljes mennyiségének hasznosíthatósága esetén), összevetve a biometán földgázhálózatba táplálásával vagy hajtóanyagcélú hasznosításával. A megvizsgált alternatívák közül a hulladékhő teljes mennyiségének felhasználhatósága esetén a kogenerációs technológia a leghatékonyabb környezeti és gazdasági szempontból is. Részbeni hőhasznosítás esetén – különösen nagyobb üzemméretben – a hajtóanyagkénti hasznosítás versenyképes lehet a kogenerációval, míg a biometán földgázhálózatba táplálása a legkevésbé előnyös megoldás.
5. Meghatároztam a napelemes rendszerek beruházási költségfüggvényét a napelemes energiatermelés (és energia-önellátás) lehetőségeinek számszerűsítése céljából – aktuális piaci rendszerköltségek alapján – a teljes rendszerre vonatkozóan:

$$y = - 23,51 x^2 + 330\,368 x + 1\,000\,000$$

ahol: y = a rendszer beruházási költsége (Ft), x = a rendszer beépített teljesítménye (kW_{el})

Az ismertett képletben az x , vagyis a rendszer kW-ban kifejezett teljesítményének értelmezési tartománya: $10 \leq x \leq 5\,000$ (a képlet számszakilag helyes eredményt a 10 kW_{el} és 5 MW_{el} napelemes rendszerek esetében ad).

A napelemes rendszerrel történő elektromos energiatermelés abban az esetben javasolható, amennyiben a rothasztott iszap energiaültetvényen történő hasznosítása a nem megfelelő minőség vagy egyéb tényező miatt akadályoztatva van.

6. Szakirodalmi hozamgörbék és saját adatgyűjtés alapján meghatároztam a szennyvíziszap-komposzt kihelyezéséhez szükséges fás szárú energiaültetvények gazdaságossági és energiahatékonysági jellemzőit. Összeállítottam a termesztéstechnológiát és költség-haszon elemzést végeztem az ültetvényre vonatkozóan – beépítve a szennyvíziszap-komposzt felhasználását. A faapríték szennyvíziszap-komposzt hasznosításával adódó önköltsége 16.380 Ft/a.t. (ami 18%-kal alacsonyabb a piaci árnál), energiamérlege 1:36. A szennyvíziszapkomposzt-felhasználást gazdaságilag és környezetileg is érdemes integrálni az energiaültetvényen történő faapríték-termeléssel.
7. Az általam vizsgált leghatékonyabb rendszerek alkalmazásával országos szinten 0,41% CO₂ megtakarítás, megújuló energetikai szempontból pedig 0,18%-os növekedés érhető el a kötelező hulladékgazdálkodási feladatok ellátásán túlmenően.

Kutatómunkám reményeim szerint hozzájárul a fenntarthatóbb és gazdaságosabb szennyvízgyártás eléréséhez, elősegíti a Magyarország esetében aktuális szennyvíztisztítási és -kezelési kötelezettségek minél hatékonyabb, sikeres teljesítését, elsődlegesen a legszélesebb körben alkalmazott (eleveniszapos) alaptechnológiát kísérő kiegészítő tevékenységekre vonatkozóan. A megalkotott modell lehetővé teszi, hogy bármely érintett informálódhasson arról, hogy adott feltételek mellett melyik alternatívát érdemes alkalmazni vagy támogatni környezeti és gazdasági szempontból. A kapott eredmények szemléltető formában történő megjelenítésével céлом hozzájárulni a hallgatói szemléletformáláshoz is, bemutatva a hulladékgazdálkodási, szennyvíztisztítási tevékenységben rejlő energia-, tápanyag-gazdálkodási és károsanyagkibocsátás-csökkentési lehetőségeket. Jelenleg is folyamatban van egy speciális felület fejlesztése, amely különböző tényezők figyelembe vétele mellett alkalmas a fenntarthatósághoz és körforgásos gazdasághoz kapcsolódó lehetőségek, kedvező hatások szemléltetésére. A vizsgált területeket érintő nemzetgazdasági előnyök számszerűsítése hozzájárulhat ahhoz, hogy a szennyvíztisztítási tevékenységre irányuló beruházások, fejlesztések állami támogatása a leginkább hatékony módon valósuljon meg.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fenntartható víz-, energia- és tápanyag-gazdálkodás napjaink legnagyobb kihívásai közé tartozik. Mindhárommal szorosan összefügg a szennyvíz témaköre, ennek megfelelően a települési szennyvízre a kötelezően ártalmatlanítandó hulladék/melléktermék helyett potenciális nyersanyagként lehet, illetve kell tekinteni. Ehhez társul a károsanyagkibocsátás-csökkentésének szükségessége. A tisztító telepek esetében a megfelelő minőségű hulladékkezelés és -ártalmatlanítás kötelezettsége mellett egyre inkább előtérbe kerül az anyag- és energiatakarékos működés megvalósításának igénye. A fenti elvárások megjelenhetnek jelentős mennyiségű energiatermelés, vagy éppen tápanyag-utánpótlás és -visszaforgatás képében is. Mindez magában foglalja a körforgásos gazdaság által képviselt szemléletmódot is, ahol a hangsúly a veszteségek minimalizálásán, az újrafelhasználáson és az újrahasznosításon van. Természetesen a vízgazdálkodási, hulladékgazdálkodási szakmai körökben időről időre előkerül az energia és tápanyagok szennyvízből való kinyerésének kérdése, ennek jelentősége, és komoly törekvések, kezdeményezések célozzák meg a minél inkább fenntartható és környezettudatos működés megvalósítását.

A szennyvíztisztítás költségein belül az iszapkezeléshez kapcsolódó költségek igen magas arányt képviselnek. Ebből kifolyólag kiemelten fontos ezen költségek csökkentése, vagy olyan megoldások alkalmazása, amelyek a bevételek növelésével javítják a jellemzően veszteséges hulladékgazdálkodási tevékenység gazdaságosságát. A szennyvíziszap-hasznosításra irányuló energetikai és egyéb megoldások felhívják a figyelmet arra, hogy egy olyan másodlagos termékről, mintegy nyersanyagról van szó, melynek észszerű hasznosítására való törekvés elengedhetetlen a fenntarthatósági, környezetvédelmi és gazdaságossági szempontokat szem előtt tartó döntéshozók és szakemberek számára.

Kutatómunkám során elsődleges célom volt, hogy primer és szekunder adatgyűjtésre alapozva azonosítsam a különböző alapterméktechnológiákhoz kapcsolható kiegészítő lehetőségeket, majd megvizsgáljam azok lehetséges hatásait az energia- és tápanyag-gazdálkodás, valamint a széndioxid-kibocsátás-csökkentés területein. Munkám során a szennyvíztelepet, mint tisztítóegységet, egyben nyersanyag-lelőhelyet állítottam középpontba. A feltérképezett kiegészítő technológiai elemek esetében először az egyes lehetőségek létjogosultságát és korlátait mértem fel, majd potenciál-becslést követően elvégeztem egyes kiegészítő elemek gazdaságossági vizsgálatát. Kutatásom során kitértem a telepméretből adódó korlátokra és a méretgazdaságosság befolyásoló hatására is. Az elvégzett kutatómunkával célom volt, hogy az egyes kiegészítő lehetőségek energia-tápanyag-károsanyag hármásra vonatkozó

sajátosságainak, rendszerbe integrálásának vizsgálata által hozzájáruljak ahhoz, hogy minél hatékonyabb, környezetbarát és költséghatékony szennyvíztisztítási tevékenység valósulhasson meg térségi, illetve országos szinten egyaránt.

A kidolgozott körfolyamatban a rothasztott szennyvíziszap komposztálása, majd annak energiaültetvényeken történő felhasználása és a megtermelhető biomassza energiatermelési célból történő hasznosítása egyszerre biztosítja a szennyvízben lévő tápanyagok és szerves anyagok teljes körű hasznosítását, valamint az energia-önellátás és további bevételek megvalósításának lehetőségét.

Munkám során kitértem a szennyvízhő-hasznosítás, a tisztított víz és a füstgáz CO₂-tartalmának algák által történő hasznosításának lehetőségeire, továbbá a napelemes energia-önellátás biztosításának vizsgálatára. A szennyvízhő-hasznosítás fenntartható és gazdaságos hasznosítása csak igen nagy (sokszázezes vagy milliós LEÉ-kapacitású) telepek, valamint megfelelő földrajzi adottságok mellett lehetséges, míg az algatermesztés komoly tőkeigénye és speciális, napjainkban még relatíve kiforratlan, kockázatos termesztéstechnológiája miatt kerül háttérbe. A napelemes energiatermelés az olyan kisebb vagy közepes méretű (pl. élőgépes vagy eleveniszapos) telepeken nyújthat megoldást az energia-önellátás megvalósítására, ahol jelentős energiaigény jelentkezik, viszont nem megoldható a gazdaságos anaerob rothasztás, vagy akadályozva van a szennyvíziszap további hasznosítása.

Magyarország megújuló alapú energiatermeléssel, fenntarthatósággal és körforgásos gazdasággal kapcsolatos célkitűzéseikhez egyértelműen hozzájárulhatnak a szennyvíztisztító telepekhez kapcsolódó, általam vizsgált kiegészítő lehetőségek. Ezek között elsődleges szerepet kaphat a szennyvíztelepi mellékterméket hasznosító, főként kedvezőtlen adottságokkal rendelkező, erózióra vagy deflációra hajlamos területeken történő biomassza-termelés, majd a faapríték kogenerációs erőművel összekötött gázosító vagy pirolízis műben történő felhasználása. A rendszerrel kapcsolatban elvárás, hogy az ültetvény minél közelebb legyen a tisztítótelephez a logisztikai költségek csökkentésének céljából.

A biomasszára alapozott, CHP-vel összekötött gázosító, valamint pirolizáló üzemeknek számos pozitív hatásuk lehet az adott térségre. Ezek között megemlíthető a helyben rendelkezésre álló biomassza (energetikai célra termesztett vagy melléktermékként/hulladékként keletkező) felhasználása, egyúttal az energiafüggőség csökkentése, a károsanyag-kibocsátás és a szállítási költségek csökkentése, a térségben munkahelyteremtő hatás elérése, az erőforrás-hatékonyság növelése, a tápanyagellátás fenntarthatóvá tételének elősegítése, valamint a különböző szektorok közötti szinergikus hatások erősítése, támogatása a körforgásos gazdaság koncepciójához is illeszkedően. Az energiatermelés céljából megtermelt biomassza folyamatos

rendelkezésre állása és a hozamok kiegyenlítése érdekében mindenképpen javasolható a két, vagy akár több egymást követő évben történő telepítés. A kezdeti – összességében alacsonyabb biomassza-hozamokat adó – években a szennyvíziszap hulladékhóvel történő szárítása, majd pedig aprítékkal történő együttégetése is alternatíva lehet.

Az előzőek alapján nagy jelentősége van a rendszerszintű tervezésnek, és a körfolyamatok beépítésének, amely által az egyébként klasszikus értelemben vett hulladékból (szennyvízből) komoly értéket képviselő termék állítható elő. A technológia fejlődésével és a lehetőségek teljeskörű feltárásával a tisztítás energiaigényét meghaladó mennyiségű energia állítható elő, emellett a tápanyagok jelentős része is hasznosítható a körfolyamat részeként. A kimenő szennyvízben, valamint szennyvíziszapban lévő makrotápelemek jelentős értéket képviselnek, egyben hozzájárulhatnak a napjainkban óriási mennyiségű műtrágya-felhasználás kiváltásához, és a költségek csökkentéséhez. A felépített rendszerben megjelenő körfolyamatban egyértelműen érvényesülnek a körforgásos gazdaság alapelemei (3R: reduce, reuse és recycle, vagyis csökkentés, újrafelhasználás és reciklálás), emellett megvalósul a veszteségek minimalizálásának elvárása is.

Doktori értekezésem egyik fő célja egy olyan objektív alapadatokra alapozott kalkulációs modell létrehozása volt, amely lehetővé teszi a szennyvíztisztítás, és a hozzá kapcsolódó energetikai és tápanyag-gazdálkodási lehetőségek költség-bevételi viszonyainak, eredményességének számszerűsítését, emellett tervezhetővé teszi a különböző megoldások CO₂-kibocsátását, így hozzájárul a károsanyagkibocsátás-csökkentési lehetőségek pontos becsléséhez is. A gazdaságossági számítások hasznosítására több lehetőség adódik: (1): környezetpolitikai célok kitűzésekor hozzájárulhat a támogatási rendszerek, ösztönzők kialakításához vagy változtatásához; (2) segítheti a hulladékgazdálkodási, energetikai, klímavédelmi kapcsolódású döntéshozatali tevékenységet; (3) támpontot adhat a kapcsolódó fejlesztések, beruházások körültekintő tervezéséhez, megvalósításához. A dolgozat rávilágít az egyes telepek, tisztító kapacitások méretgazdaságosságának jellemzőire, emellett az érzékenységi- és küszöbérték-vizsgálat által gazdaságilag és környezetileg megalapozottabb, hatékonyabb beruházások valósíthatók meg.

IRODALOMJEGYZÉK

1. Agroinform (2016): A mezőgazdasági gépüzemeltetés várható költsége 2016-ban. <https://www.agroinform.hu/gepeszet/a-mezogazdasagi-gepuzemeltetes-varhato-koltsege-2016-ban-25840-001> (letöltve: 2018.08.10.)
2. Agroinform (2019): AKI Piaci Árinformációk. Biodízel nagykereskedelmi ára Németországban. https://www.agroinform.hu/termenypiac_aki_piaci_arfolyamok/nemzetkozi_arinformacio_k/nemzetkozi_biouzemanyag/biodizel_nagykereskedelmi_ara_nemetorszagban? (letöltve: 2019.01.10.)
3. Agrotrend (2017): Gépi munkák költsége 2017-ben. <https://www.agrotrend.hu/technika/gepesites/igy-alakulnak-iden-a-mezogazdasagi-gepi-munkak-koltsegei> (letöltve: 2018.10.20.)
4. Ahammad, S.Z. - Sreekrishnan, T.R. (2016): Chapter 20 - Energy from Wastewater Treatment, Editor(s): M.N.V. Prasad. Bioremediation and Bioeconomy. Elsevier, 2016. pp. 523-536. ISBN 9780128028308.
5. Aman, M. M. - Solangi, K. H. - Hossain, M. S. - Badarudin, A. - Jasmon, G. B.- Mokhlis, H. (2015): A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 41:1190–1204.
6. Astals, S. - Batstone, D. J. - Mata-Alvarez, J. - Jensen, P. D. (2014): Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes. Bioresource Technology. 169:421–427.
7. Bai, A. (2005): Új utak a mezőgazdaságban, Gazdasági tényezők. In: Gonczlik A., Kazai Zs., Körös G. (szerk.) (2005): Új utak a mezőgazdaságban, Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület. Budapest, 2005. 33 p.
8. Bai A. (2011): Újabb generációs bio-üzemanyagok perspektívái. Magyar Tudomány. 172(7):861-871.
9. Bai A. (2015): Helyi közlekedés és hulladékgyűjtés. Magyar Energetika. 22(1):21-25.
10. Bai, A. - Gabnai, Z. (2014): Energianyeréssel kombinált innovatív szennyvízkezelési eljárások. LVI. Georgikon Napok. Pannon Egyetem, Georgikon Kar. Keszthely. pp. 25-34. ISBN: 9789639639591.
11. Bai, A. - Lakner, Z. - Marosvölgyi, B. - Nábrádi, A. (2002): A biomassza felhasználása. Szaktudás Kiadó Ház. Budapest. 226 p. ISBN 963-9422-460.
12. Bai, A. - Popp, J. - Balogh, P. - Gabnai, Z. - Pályi, B. - Farkas, I. - Pintér, G. - Zsiborács, H. (2016): Technical and economic effects of cooling of monocrystalline photovoltaic modules under Hungarian conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 60:1086-1099.
13. Bai, A. - Popp, J. - Pető, K. - Szőke, I. - Harangi-Rákos, M. - Gabnai, Z. (2017): The Significance of Forests and Algae in CO₂ Balance: A Hungarian Case Study. Sustainability. 9(5):857.
14. Bai A., - Stündl L. - Bársony P. - Fehér M. - Jobbágy P. - Herpergel Z. - Vaszkó G. (2012): Algae production on pig sludge. Agronomy for Sustainable Development. 32(3):611-618.
15. Bakti, B. (2017): Kedvezőtlen termőhelyi feltételek mellett telepített fás szárú energetikai ültetvény hozamvizsgálata. Erdő-Mező Online, 2017. <http://erdo->

mezo.hu/2017/05/03/kedvezotlen-termohelyi-feltetelek-mellett-telepitett-fas-szaru-energetikai-ultetveny-hozamvizsgalata/. (letöltve: 2018.05.06.)

16. Bányai, Zs. - Fazekas, B. - Pitás, V. - Kárpáti, Á. (2009): A szennyvíztisztítás energiahatékonysága. Műszaki Kémiai Napok, Veszprém. 2009. április 20. Kiadvány. pp. 35-39.
17. Bányai, Zs. - Pitás, V. - Reich, K. - Kárpáti, Á. (2014a): Víz – szennyvíz, mint energiaigény és megújuló energiaforrás. pp. 85-95. IN: Eleveniszapos rendszerek. TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0015. „Felsőoktatási együttműködés a vízügyi ágazatért. 2014. http://vizugy.uni-pannon.hu/content/administration/tananyagok/Eleveniszapos_rendszerek.pdf (letöltve: 2017.05.10.)
18. Bányai, Zs. - Thury, P. - Kárpáti, Á. (2014b): Energiahatékonyság a szennyvíztisztításnál. pp. 96-104. IN: Eleveniszapos rendszerek. TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0015. „Felsőoktatási együttműködés a vízügyi ágazatért. 2014. http://vizugy.uni-pannon.hu/content/administration/tananyagok/Eleveniszapos_rendszerek.pdf (letöltve: 2018.05.10.)
19. Barkóczy Zs. - Ivelics R. - Marosvölgyi B. (2007): Energetikai faültetvények I. Bioenergia, 2(3):7-11. In Popp, J. (szerk.), Potori, N. (szerk.) (2011): A biomassza energetikai célú termelése Magyarországon. Agrárgazdasági Kutató Intézet. Budapest. ISBN 978-963-491-570-6.
20. Barkóczy, Zs. - Ivelics, R. (2008): Energetikai célú ültetvények. Erdészeti Kisfüzetek. Lövér-Print Kft. Sopron. 10. p.
21. Basu, P. (2013): Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory. Second edition. Elsevier. 2013. 529 p.
22. Batstone, D.J. - Viridis, B. (2014): The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy. Current Opinion in Biotechnology. 27:142–149.
23. Baum, C. - Leinweber, P. - Weih, M. - Lamersdorf, N. - Dimitriou, I. (2009): Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. 59(3):183-196. ISSN 0458 - 6859.
24. Bhandari, K. P. - Collier, J. M. - Ellingson, R. J. - Apul, D. S. (2015): Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 47:133-141.
25. Blankenship, R. E. - Tiede, D. M. - Barber, J. - Brudvig, G. W. - Fleming, G. - Ghirardi, M. - Gunner, M. R. - Junge, W. - Kramer, D. M. - Melis, A. - Moore, T. A. - Moser, C. C. - Nocera, D. G. - Nozik, A. J. - Ort, D. R. - Parson, W. W. - Prince, R. C. - Sayre, R. T. (2011): Comparing Photosynthetic and Photovoltaic Efficiencies and Recognizing the Potential for Improvement. Science. 332:805-809.
26. Boboescu, I. Z. - Gherman, V. D. - Mirel, I. - Pap, B. - Tengölics, R. - Rákhely, G., - Kovács, K. L. - Kondorosi, É. - Maróti, G. (2014). Simultaneous biohydrogen production and wastewater treatment based on the selective enrichment of the fermentation ecosystem. International Journal of Hydrogen Energy. 39(3):1502-1510.
27. Bodáné Kendrovics, R. (2018): A szennyvíz mezőgazdasági felhasználásának indokai és feltételei. Hírcsatorna. A Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség Lapja. 2017/6. pp. 5-23.
28. Bodnár I. (2016): Hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata energiahatékonyság, költség-haszon és életciklus-elemzési módszerekkel. Doktori (Ph.D.)

értekezés. Miskolci Egyetem, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola. Miskolc.

29. Bodo, W. (2015): Tisztítóműtől az erőműig. Vízmű Panoráma. A Magyar Víziközmű Szövetség Lapja. XXIII/2015. 1. szám. http://www.maviz.org/system/files/vizmu_panorama_2015-1.pdf (letöltve: 2018.02.13.)
30. Borovics (2007): Energetikai célú nyárfatermesztés. In: Erdészeti Lapok. CXLII. évf. 4. szám. pp. 110-113.
31. Chae, S. R. - Hwang, E. J. - Shin, H.S. (2006): Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photobioreactor. *Bioresource Technology*. 97:322–329.
32. CNGEUROPE (2019): <http://cngeuropa.com/countries/hungary/> (letöltve: 2018.09.10.)
33. Craggs, R. - Sutherland, D. - Campbell, H. (2012): Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Journal of Applied Phycology*. 24:329-337.
34. Czupy, I. - Horváth, B. - Vágvölgyi, A. (2015): Rövid vágásfordulójú energetikai faültetvények technológiai sajátosságai. *Erdő-Mező*. <http://erdo-mezo.hu/2015/01/05/rovid-vagasforduloju-energetikai-faultetvenyek-technologiai-sajatossagai/> (letöltve: 2018.07.10.)
35. Csipkés, M. (2011): Biomassza energiaforrások felhasználási lehetőségei Magyarországon, szénhidrogének kiegészítőjeként. *Magyar Energetika*. 18(4):14-18.
36. Damodaran (2019a): Total beta. www.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/totalbeta.xls (letöltve: 2019.01.10.)
37. Damodaran (2019b): Country premium. www.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/ctryprem.xls (letöltve: 2019.01.10.)
38. De Gioannis, G. - Muntoni, A. - Poletini, A. - Pomi, R. (2013): A review of dark fermentative hydrogen production from biodegradable municipal waste fractions. *Waste Management*. 33(6):1345-1361.
39. DEFRA – Department for Environmental, Food and Rural Affairs (2007): Growing Short Rotation Coppice. Best Practice Guidelines for Applicants to DEFRA’s Energy Corp Scheme In: Csipkés M. (2011): Biomassza energiaforrások felhasználási lehetőségei Magyarországon, szénhidrogének kiegészítőjeként. *Magyar Energetika*. 18(4):14-18.
40. Demirbas, A. - Demirbas, M.F. (2011): Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 52:163-170.
41. Dimitriou, I. - Baum, C. - Baum, S. - Busch, G. - Schulz, U. - Köhn, J. - Lamersdorf, N. - Leinweber, P. - Aronsson, P. - Weih, M. - Berndes, G. - Bolte, A. (2009): The impact of Short Rotation Coppice (SRC) cultivation on the environment. 59(3):159-162. ISSN 0458 - 6859.
42. Dirkzwager, A. H. - L'Hermite, P. (1989): Sewage sludge treatment and use: new developments, technological aspects, and environmental effects. Conference Proceedings. Elsevier Applied Sciences. London, New York.
43. Dittrich, E. (2016): Természetközeli szennyvíztisztítás alkalmazási lehetőségei - szolgáltatásaink - referenciák. http://www.lentileader.hu/feltoltes/files/6_EA_dittrich_erno_gyokerzonas_Hidro_Consulting.pdf (letöltve: 2018. 02. 10.)

44. Dulovics, D. (2012): A szennyvíztechnika energiakérdései. MaSzeSz Hírcsatorna. 7-8:3-11.
45. Ecoscore (2019): <http://www.ecoscore.be/en/how-calculate-co2-emission-level-fuel-consumption> (letöltve: 2018.11.10.)
46. EEX (2019): European Emission Allowances. <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market/european-emission-allowances#!/2019/02/08> (letöltve: 2019.02.08.)
47. Ellen MacArthur Foundation (2013). Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation Publishing, UK. 98 p.
48. ENERWATER (2017): ENERWATER Project H2020 Framework Programme for Research and Innovation. Grant agreement number 644771. <http://www.enerwater.eu/> (letöltve: 2018. 09. 12.)
49. EPA (2017): Catalog of CHP Technologies. U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. 150 p. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies.pdf (letöltve: 2019.01.20.)
50. Erdős, L. (2007): Ültetvényerdők szerepe a távlati földhasználatban. Gazdálkodás. 51(4):24-37.
51. Európai Bizottság (2013): A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, a Tanácsnak, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régió Bizottságának. Konzultációs célú közlemény a fenntartható foszforhasználatról (EGT-vonatkozású szöveg). COM(2013) 517 final. Európai Bizottság, Brüsszel, 2013. 07. 08.
52. Európai Parlament (2017): Amit érdemes tudni az EU kibocsátás-kereskedelmi rendszeréről és reformjáról. <http://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20170213STO62208/amit-erdemes-tudni-az-eu-kibocsatas-kereskedelmi-rendszererol-es-reformjarol>. (letöltve: 2018. 08. 17.)
53. Európai Parlament (2018): Az üvegházhatású gázok csökkentése az EU-ban: Nemzeti célkitűzések 2030-ra. <http://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20180208STO97442/az-ueveghazhatasu-gazok-csokkentese-az-eu-ban-nemzeti-celkituzesek-2030-ra> (letöltve: 2019.02.10.)
54. European Commission (2014): Summary of the Responses to the Consultative Communication on the Sustainable Use of Phosphorus. Commission Staff Working Document [COM(2013)517]. [http://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/phosphorus/SWD\(2014\)263%20final.pdf](http://ec.europa.eu/environment/natres/pdf/phosphorus/SWD(2014)263%20final.pdf). (letöltve: 2018.06.10.)
55. European Commission (2018): Energy dependence. https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=t2020_rd320&plugin=1 (letöltve: 2018.10.11.)
56. European Commission (2018): Körforgásos gazdaság: Az új szabályok révén az EU globális szinten élenjáróvá válik a hulladékgazdálkodás és az újrafeldolgozás terén. Európai Bizottság – Sajtóközlemény. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3846_hu.htm (letöltve: 2018.09. 10.)

57. EUROSTAT (2017): Sewage sludge disposal from urban wastewater treatment, by type of treatment, 2015 (% of total mass). [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment_by_type_of_treatment_2015_\(%25_of_total_mass\)_V2.png&oldid=349285](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment_by_type_of_treatment_2015_(%25_of_total_mass)_V2.png&oldid=349285). (letöltve: 2019. 01. 29.)
58. EUROSTAT (2018a): Electricity prices for non-household consumers, second half 2017. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_non-household_consumers,_second_half_2017_\(EUR_per_kWh\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_prices_for_non-household_consumers,_second_half_2017_(EUR_per_kWh).png) (letöltve: 2018.11.10.)
59. EUROSTAT (2018b): Natural gas prices for non-household consumers. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Natural_gas_price_statistics#Natural_gas_prices_for_non-household_consumers (letöltve: 2018.11.10.)
60. FAO (2016): Number of municipal wastewater treatment facilities. http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html?regionQuery=true&yearGrouping=SURVEY&yearRange.fromYear=1960&yearRange.toYear=2015&varGrpIds=4515®Ids=9805,9806,9807,9808,9809&includeRegions=true&showValueYears=true&categoryIds=-1&XAxis=YEAR&showSymbols=true&showUnits=true&hideEmptyRowsColumns=true&_hideEmptyRowsColumns=on&lang=en&query_type=glossary. (letöltve: 2016. 10. 18.)
61. FAO (2016b). Treated municipal wastewater (10^9 m³/year). http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html?regionQuery=true&yearGrouping=SURVEY&yearRange.fromYear=1960&yearRange.toYear=2015&varGrpIds=4270®Ids=9805,9806,9807,9808,9809&includeRegions=true&showValueYears=true&categoryIds=-1&XAxis=YEAR&showSymbols=true&showUnits=true&hideEmptyRowsColumns=true&_hideEmptyRowsColumns=on&lang=en&query_type=glossary. (letöltve: 2016. 10. 18.)
62. FAO (2018): Water scarcity. Land & Water. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/>. (letöltve: 2018. 08. 10.)
63. Farkas, C. – Randriamampianina, R. – Majercka, J. (2005): Modelling impacts of different climate change scenarios on soil water regime of a mollisol. *Cereal Research Communication*. 34(1):185-188.
64. Fillmore, L. (2014): Energy Recovery Potential from Wastewater Utilities through Innovation. Konferencia előadás. Conversion Technologies III: Energy from Our Waste – Will we Be Rich in Fuel or Knee Deep in Trash by 2025? Water Environment Research Foundation. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/11/f19/fillmore_biomass_2014.pdf (letöltve: 2018. 06. 20.)
65. Fogarassy, Cs. - Horváth, B. - Herczeg, B. - Bakosné Böröcz, M. (2018): Cirkuláris gazdasági modellek alkalmazása és hatékonyságuk mérése. Szent István Egyetem, Klímagazdaságtani Elemző- és Kutatóközpont. In: Lehota József (szerk.) *Életem a felsőoktatásban: Dr. Molnár József 70 éves*. 226 p.
66. Fogarassy, Cs. - Nábrádi, A. (2015): Proposals for low-carbon agriculture production strategies between 2020 and 2030 in Hungary. *APSTRACT: Applied Studies in Agribusiness and Commerce*. 9(4):5-16.

67. Fränne, L. (2007): Hammarby Sjöstad – a unique environmental project in Stockholm. GlashusEtt. Study. 40 p.
http://large.stanford.edu/courses/2014/ph240/montgomery2/docs/HS_miljo_bok_eng_ny.pdf (letöltve: 2019. 04. 20.)
68. Fytili, D. - Zabaniotou, A. (2008): Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12:116-140.
69. Gabnai, Z. (2011): Rövid vágásfordulójú nemesnyár energiátültetvények gazdasági értékelése Hajdú-Bihar megyében. *Gazdálktud. Közl.* 3(1):19-25.
70. Gabnai, Z. (2011): A faapríték-termelés és az önkormányzati energia-gazdálkodás rendszerszemléletű gazdasági elemzése esettanulmány alapján. *Gazdálktud. Közl.* 3(1): 57-63.
71. Gabnai, Z. (2014): Innovatív szennyvíztisztítási módszerek komplex elemzése. In: *Környezettudatos energiatermelés és -felhasználás: III. Környezet és Energia Konferencia*. Szerk.: Szabó Valéria, Fazekas István. MTA DAB Megújuló Energetikai Munkabizottság, Debrecen. pp. 160-165. ISBN: 9789637064319.
72. Gabnai, Z. - Bai, A. (2016): A szennyvíztisztítás és a hajtóanyagcélú biogáz-hasznosítás. LVIII. Georgikon Napok. Felmelegedés Ökolábnymó Élelmiszerbiztonság. Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely. pp. 111-115. ISBN: 9789639639850.
73. Gabnai, Z. (2017): Energy alternatives in large-scale wastewater treatment. *APSTRACT: Applied Studies in Agribusiness and Commerce*. 11(3-4):141-146.
74. Gabnai, Z. - Bai, A. (2018): Energy self-sufficiency of urban wastewater treatment plants. LX. Georgikon Napok. pp. 510-514.
75. Gabnai, Z. - Gál, B. S. (2016): A szennyvíziszap-hasznosítás energetikai és egyéb lehetőségei. *Journal of Central European Green Innovation*. 4(1):13-30.
76. Gaius-Obaseki, T. (2010): Hydropower opportunities in the water industry. *International Journal of Environmental Sciences*. 1(3):392-402.
77. Gajdov, G. (2004): A nádgyökérteres szennyvíztisztítási technológia vizsgálata és környezetvédelmi értékelése. Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar. 77 p.
78. Garai, Gy. (2005): Megújuló energiaforrások kihasználása a szennyvíztisztításban. *HÍRCSATORNA*. 11-12:3-4.
79. Garai, Gy. (2017): Szakaszos üzemű eleveniszapos szennyvíztisztítás. *Hírcsatorna. A Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség Lapja*. 2017/3. pp. 22-23.
80. Geissdoerfer, M. - Savaget, P. - Bocken, N. - Hultink, E. (2017): The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, 143(1):757-768.
81. Gerencsér, A. (2012): Energetikai nyárültetvény. *Kertészet és szőlészet*. 61(1):12-13.
82. Gergely, S. (2012): Biomasszatüzelés. Károly Róbert Főiskola. ISBN 978-963-9941-39-7.
83. Ghisellini, P. - Cialani, C. - Ulgiati, S. (2016): A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. 114:11-32.
84. Gikas, P. (2017): Towards energy positive wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*. 203, 621-629.

85. Gittinger, J. P. (1982): *Economic Analysis of Agricultural Projects*. Second Edition, Completely Revised and Expanded. EDI Series in Economic Development. World Bank. The Johns Hopkins University Press. Baltimore and London. 506 p.
86. Gockler, L. (2016): Mezőgazdasági gépek üzemeltetési költsége 2016-ban. *Mezőgazdasági Technika*. 2016/1. pp. 39-43.
87. Grando, R. L. - de Souza Antune, A. M. - Da Fonseca, F. V. - Sánchez, A. - Barrena, R., - Font, X. (2017): Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80:44-53.
88. Grant, N. - Moodie, M. - Weedon, C. (2009): Szennyvízkezelés. Élőgépek – Gyökérmezők – Komposztvécék. Cser Kiadó. ISBN: 978-963-2780-4-12. 128 p.
89. Grant, N. - Moodie, M. - Weedon, C. (2012): The centre for alternative technology, Choosing ecological Sewage treatment. CAT Publication. p. 184. IN: Veres, Z. T. (2015): Hagyományos aktíviszapos szennyvíztisztító telepek fejlesztéseinek potenciális hatékonysága. Doktori (PhD) értekezés. Debreceni Egyetem TTK.
90. Grasselli, G. (szerk.) - Bai, A. - Bohoczky, F. - Marosvölgyi, B. (2004): Munkahelyteremtő megújuló energiaforrások hasznosításának megvalósíthatósági tanulmányterve a Debreceni Agglomeráció térségben. Tanulmány. In: Grasseli, G. - Szendrei J. (2006): A tüzelési célú energetikai növények termesztésének jelentősége. *Őstermelő: Gazdálkodók lapja*. 10(3):70-72.
91. Gu, Y. - Li, Y. - Li, X. - Luo, P. - Wang, H. - Wang, X. - Wu, J. - Li, F. (2017): Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia*. 105:3741-3751.
92. Gude, V. G. (2015). Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 45:52-68.
93. Gude, V. G. (2015): Energy positive wastewater treatment and sludge management. *Edorium Journal of Waste Management*. 1:10-15.
94. Gyuricza, Cs. (2007): Cultivating woody energy crops for energetic purposes. *Biowaste*. 2(4):25-32.
95. Gyuricza, Cs. (2011a): Növénytaplálás energiaültetvényeken. Fás szárú energianövények termesztése 5. *Agrofórum*. 22(3):92-96.
96. Gyuricza, Cs. (2011b): Fás szárú energiaültetvények termesztése (6.): Energiaültetvény létesítése – ültetési alapanyag és telepítés. *Agrofórum*. 22(12):68-73.
97. Gyuricza, Cs. (2014a): A talaj- és környezetminőség javítása és fenntartása növénytermesztési módszerekkel. MTA doktori értekezés. Szent István Egyetem, Növénytermesztési Intézet. Gödöllő, 2014. 163 p.
98. Gyuricza, Cs. (2014b): Komposztok felhasználása az energetikai ültetvényekben. *Agronapló*. <https://www.agronaplo.hu/szakfolyoirat/2009/04/szantofold/komposztok-felhasznalasa-az-energetikai-ultetvényekben>. (letöltve: 2019.01.20.)
99. Hakawati, R. - Smyth, B. M. - McCullough, G. - De Rosa, F. - Rooney, D. (2017): What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?. *Applied Energy*. 206:1076-1087.
100. Hanaoka, T. - Inoue Uno, S. - Ogi, T. - Minowa, T. (2005): Effect of wood biomass components on air-steam gasification. *Biomass and Bioenergy*. 28(1):69–75.

- 101.Harnos, Z. - Gaál, M. - Hufnagel, L. (2008): Klímaváltozásról mindenkinek. Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar. Budapest. ISBN 978-963-503-384-3. 199 p.
- 102.Heinsoo, K. - Dimitriou I. - Foellner S. - Buergow, G. (2008): Short Rotation Plantations. Guidelines for efficient biomass production with the safe applications of wastewater and sewage sludge. European Commission Biopros research project. Published by IEES – International Ecological Engineering Society.
- 103.Helfert, E. A. (2001): Financial Analysis: Tools and Techniques: A Guide for Managers. 10th Edition. McGraw-Hill, New York. pp. 221-296. ISBN: 0-07-137834-0.
- 104.Heller, M. C. - Keoleian, G. A. - Volk, T. A. (2003): Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. Biomass and Bioenergy. 25:147-165.
- 105.Henze, M. - van Loosdrecht, M. C. - Ekama, G. A. - Brdjanovic, D. (2008): Biological wastewater treatment. Principles, Modelling and Design. IWA publishing. 513 p. ISBN: 1843391880.
- 106.Hill, T. - Downen, S. (2010): Pyrolysis and gasification. Briefing (Draf 2), UK Without Incineration Network (UK WIN). pp. 1–9.
- 107.Holm, B. - Heinsoo, K. (2013): Influence of composted sewage sludge on the wood yield of willow short rotation coppice. An Estonian study. Environment Protection Engineering. 39(1):17-32.
- 108.Horánszky, B. (2012): A földgázpiac új szereplője: a biogáztermelő. Műszaki Földtudományi Közlemények. 83(1):81-86.
- 109.Hosenuzzaman, M. - Rahim, N. A. - Selvaraj, J. - Hasanuzzaman, M. - Malek, A. B. M. A. - Nahar, A. (2015): Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 41:284–297.
- 110.Iacovidou, E. - Ohandja, D-G. - Voulvoulis, N. (2012): Food waste co-digestion with sewage sludge – Realising its potential in the UK. Journal of Environmental Management. 112:267-274.
- 111.IPCC (2006): https://ipcc.kormany.hu/download/1/ce/80000/ammonia_savak_mutragyak_osszefoglalo.pdf. (letöltve: 2018.10.20.)
- 112.Ivelics, R. (2006): Minirotációs energetikai faültetvények termesztés-technológiájának és hasznosításának fejlesztése. Doktori (Ph.D.) értekezés. Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Biokörnyezettudomány Program. 204 p.
- 113.Jenicek, P. - Kutil, J. - Benes, O. - Todt, V. - Zabranska, J. - Dohanyos, M. (2013): Energy self-sufficient sewage wastewater treatment plants: is optimized anaerobic sludge digestion the key?. Water Science and Technology. 68(8):1739-1744.
- 114.Jin, C.-L. - Wu, Z.-M. - Wang, S.-W. - Cai, Z.-Q. - Chen, T. - Farahani, M. R. - Li, D.-X. (2017): Economic assessment of biomass gasification and pyrolysis: A review. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy. 12(11):1030-1035.
- 115.Jobbágy, P. (2013): A hazai biodízel-ágazat komplex elemzése. Doktori (Ph.D.) értekezés. Debreceni Egyetem, Ihrig Károly Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola. 157 p.
- 116.Judd, S. J. - Al Momani, F. A. O. - Znad, H., - Al Ketife, A. M. D. (2017): The cost benefit of algal technology for combined CO2 mitigation and nutrient abatement. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 71:379-387.

117. Juhász J. (1977): Víz tisztaságvédelmi módszerek és berendezések. Tankönyvkiadó, Budapest. 162 p.
118. Kalavrouziotis, I. K. (2017): Wastewater and Biosolids Management. 138 p. ISBN: 9781780408224.
119. Kárpáti, Á. (2002): Anaerob szennyvíziszap rothasztás. 1-18. Szennyvíziszap rothasztás és komposztálás - Tanulmánygyűjtemény (No. 6.) Veszprémi Egyetem, Környezetmérnöki és Kémiai Technológia Tanszék.
120. Kárpáti, Á. (2011): Vízgazdálkodás – szennyvíztisztítás. Szerk.: Domokos, E. Környezetmérnöki Tudástár. X kötet. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet. 241 p.
121. Kárpáti, Á. (2014): Szennyvíztisztítás korszerű módszerei. Szerk.: Domokos, E. Környezetmérnöki Tudástár. XXXII. kötet. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet. 280 p.
122. Kárpáti, Á. (2016): Szennyvíztisztítás – energetika – gazdálkodás a lakosság/települések szennyvizének tisztításában. Hírcsatorna. A Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség Lapja. 2016/3. szám. pp. 6-21.
123. Kárpáti, Á. (2017): Szennyvíziszapok – újrahasznosítási lehetőségek – EU gyakorlat. Hírcsatorna. A Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség Lapja. 2017/1. szám. pp. 20-38.
124. Kárpáti, Á. (2018): Lakossági szennyvíziszapok és rothasztásuk tapasztalatai I. A rothasztás hazai nagykönyvének tanulságai. A Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség Lapja. 2018/3. szám. pp. 5-30.
125. Kim, M. - Chowdhury, M.M.I. - Nakhla, G. - Keleman, M. (2017): Synergism of co-digestion of food wastes with municipal wastewater treatment biosolids. Waste Management. 61:473-483.
126. Kim, S-H. - Han, S-K. - Shin, H-S. (2004): Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. International Journal of Hydrogen Energy. 29:1607-1616.
127. Kiss, P. (2016): Szennyvíz hőjének hasznosítása. <https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2016/junius/4073-szennyviz-hojenek-hasznositasa>. (letöltve: 2018.07.05.)
128. Kiss, T. - Hetesi, Zs. (2018): Ember és természet. Kiút a zsákutcából. Nemzeti Közzolgálati Egyetem. 78 p. <https://vtk.uni-nke.hu/document/vtk-uni-nke-hu/Ember%20C3%A9s%20term%20C3%A9szet%20-%20Ki%20C3%BAt%20a%20zs%20C3%A1kutc%20C3%A1b%20C3%B3l.pdf> (letöltve: 2019.02.11.)
129. Knowles J. (2011): Overview of small and micro combined heat and power (CHP) systems. Small and micro combined heat and power (CHP) systems-advanced design, performance, materials and applications. Woodhead Publishing Series in Energy. pp. 3–16.
130. Kocsis, I. (2011): Hígrágya és szennyvíziszap kezelés. Szent István Egyetem. Jegyzet.
131. Kondor, A. (2015): A Földhasználat átalakításának lehetősége az "energiafűz" (*Salix viminalis* L.) termesztésbe vonásával Szabolcs-Szatmár-Bereg megyében. Doktori (Ph.D.) értekezés. Debreceni Egyetem, Kerpely Kálmán Növénytermesztési, Kertészeti és Regionális Tudományok Doktori Iskola. Debrecen. 227 p.
132. Kovács, Z. (2017): Városok és urbanizációs kihívások Magyarországon. Magyar Tudomány. 178(3):258-260.

- 133.KSH (2018): A települések infrastrukturális ellátottsága, 2017. Statisztikai Tükör. Központi Statisztikai Hivatal. 2018. november 9. <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/telepinfra/telepinfra17.pdf> (letöltve: 2019.01.10.)
- 134.KSH (2019a): A mezőgazdasági ráfordítások átlagárai. Központi Statisztikai Hivatal. http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_evkozi/e_qsmb001a.html (letöltve: 2018.11.10.)
- 135.KSH (2019b): http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_evkozi/e_qsmb001a.html (letöltve: 2018.12.14.)
- 136.KSH (2019c): Légszennyező anyagok és üvegházhatású gázok kibocsátása (1985–). http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ua002d.html (letöltve: 2019.02.10.)
- 137.Kuźnia, M. - Jerzak, W. - Łyko, P. - Sikora, J. (2015): Analysis of the combustion products of biogas produced from organic municipal waste. *Journal of Power Technologies*. 95(2): 158-165.
- 138.KVVM (2005): Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium: Segédlet a korszerű egyedi szennyvízkezelés és a természetközeli szennyvíz tisztítás alkalmazásához. Budapest. pp. 19-20.
- 139.KVVM (2006): Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium: Természetközeli szennyvíztisztítási eljárások. Kézikönyv. Budapest. pp. 2-8.
- 140.KVVM (2014): Klímapolitika. Az üvegházhatású gázok kibocsátás-csökkentésének energetikai vonatkozásai. Éghajlat-politikai háttér tanulmány. http://klima.kvvm.hu/documents/14/NES_energetika.pdf (letöltve: 2018.10.20.)
- 141.Labrecque, M. - Teodorescu, T. I. (2003): High biomass production by Salix clones on SRC following two 3-year coppice rotation on abandoned farmland in southern Quebec. *Canada Biomass and Bioenergy*. 25:135-146.
- 142.Lau, P. - Tam, N. - Wong, Y. (1995): Effect of algal density on nutrient removal from primary settled wastewater. *Environmental Pollution*. 89:59-66.
- 143.Laureysens, I. – Bogaert, J. – Blust, R. – Ceulemans, R. (2004): Biomass production of 17 poplar clones in a short rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Foresyt Ecology and Management*. 187:295-309.
- 144.Lee, Y. W. - Chung, J. (2010): Bioproduction of hydrogen from food waste by pilot-scale combined hydrogen/methane fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(21):11746-11755.
- 145.Liebhard, P. (2009): Energetikai faültetvények. Rövid vágásfordulójú faanyagtermelés. A jövő nyersanyaga. Cser Kiadó, Budapest. 108 p. ISSN 978-963-278-101-3.
- 146.Ligetvári F. - Zsabokorszky F. (2015): Az Európai Unióhoz történt csatlakozás hatása a hazai szennyvíztisztításra és iszapkezelésre. IN: Simon L. - Vincze Gy. (szerk.): Szennyvizek és szennyvíziszapok hasznosítása a régió fenntartható mezőgazdaságáért. Nyíregyházi Főiskola. pp. 33-38. ISBN 978-615-5545-02-3.
- 147.Lin, Y. - Zhou, S. - Li, F. - Lin, Y. (2012): Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement. *Journal of Hazardous Materials*. 213-214:457-465.
- 148.Mádainé, Üveges V. (2012): Fás szárú biomassza fűtési célra történő felhasználásának lehetőségei. *HulladékOnline elektronikus folyóirat*. 3(2). 18 p. ISSN 2062-9133.

- 149.Malin, J. (2007): Energy Benchmark for Wastewater Treatment Processes - a comparison between Sweden and Austria. Theses. Lund University. 74 p.
- 150.Markó, Cs. (2018): A hulladékgazdálkodás jelene. Gazdálkodási és Tudományos Társaságok Szövetsége konferencia, HUHA. Környezetvédelmi Szolgáltatók és Gyártók Szövetsége. 2018. április 18. https://www.gttsz.hu/wp-content/uploads/2018/05/Marko_hg_Jelen.pdf (letöltve: 2018.11.10.)
- 151.Martínez, M.E. - Sánchez, S. - Jiménez, J.M. - El Yousfi, F. - Muñoz, L. (2000): Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *scenedesmus obliquus*. *Bioresource Technology*. 73:263-272.
- 152.Matteson G. C. - Jenkins B. M. (2007): Food and processing residues in California: resource assessment and potential for power generation. *Bioresource Technoly*. 98:3098-3105.
- 153.McCarty, L. - Bae, J. - Kim, J. (2011): Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer – Can This be Achieved? *Environmental Science & Technology*. 45:7100-7106.
- 154.MEKH (2012): Magyar Energia Hivatal módszertani útmutatója az átvételi kötelezettség alá eső villamos energia mennyiségének és a kötelező átvétel időtartamának megállapításáról. 2012. http://www.mekh.hu/download/4/01/00000/kat_modszertani_utmutato_2012_jan.pdf (letöltve: 2018.09.20.)
- 155.MEKH (2019): METÁR árak megújuló. Magyar Energetikai és Közmű-Szabályozási Hivatal. http://mekh.hu/download/2/13/70000/METAR_arak_megujulo_2017_2019.xlsx (letöltve: 2018.11.10.)
- 156.Mergner, R. - Rutz, D. - Wagner, I. - Amann, S. - Amann, C. - Kulišić, B. - Abramovic, J. M. - Pozar, H. - Vorisek, T. - Bailón Allegue, I. - Hinge, J. - De Filippi, F. - Dzene, I. - Surowiec, M. - Adamescu, C. M. - Ofiteru, A. (2013): European Strategy Paper on Heat Use from Biogas Plants. WIP Renewable Energies. Biogas Heat. Project No: IEE/11/025. Munich, Germany. 22 p.
- 157.Mészáros, J. (2016): Költségelemzés és optimalizálás, gazdaságosság és kényszer – tapasztalatok kis szennyvíztisztító telepek (nyitott) komposztálási technológiájával kapcsolatban. MASZESZ Szennyvíziszap Komposzt Mezőgazdasági Hasznosítása Szakmai nap. 2016.10.26. http://www.maszesz.hu/images/maszesz/tartalmak/szennyviziszap%20komposzt%20szakmai%20nap%20eloadasok/mesaros-jozsef_nyirsegviz.pdf (letöltve: 2018.05.14.)
- 158.Metcalf – Eddy (1991): *Wastewater Engineering*, 3rd Ed. New York: McGraw-Hill. 1334 p. ISBN 0-07-041690-7.
- 159.Mizuta, K. - Shimada, M. (2010): Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan. *Water Science and Technology*. 62(10):2256–2262.
- 160.Mo, W. - Zhang, Q. (2013): Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*. 127C:255-267.
- 161.Mola-Yudego, B. - Aronsson, P. (2008): Yield models for commercial willow biomass plantations in Sweden. *Biomass and Bioenergy*. 32:829-837.
- 162.Nabel, M. - Barbosa, DBP. - Horsch, D. - Jablonowski, N. D. (2014): Energy crop (*Sida hermaphrodita*) fertilization using digestate under marginal soil conditions: A dose-response experiment. European Geosciences Union General Assembly 2014, EGU 2014. *Energy Procedia*. 59:127–133.

163. Nábrádi, A. - Szöllősi, L. (2007): Key aspects of investment analysis. Applied Studies in Agribusiness and Commerce (APSTRACT). Agroinform Publishing House. 1(1):53-56. HU-ISSN 1789-221X.
164. Nagarajan, S. - Chou, S. K. - Cao, S. - Wu, C. - Zhou, Z. (2013): An updated comprehensive techno-economic analysis of algae biodiesel. Bioresource Technology. 145:150-156.
165. Nagy, D. - Balogh, P. - Gabnai, Z. - Popp, J. - Oláh, J. - Bai, A. (2018): Economic Analysis of Pellet Production in Co-Digestion Biogas Plants. Energies. 11(5):1135.
166. NAK (2018): A 2018. júniusi földgáz- és villamosenergia-piaci összefoglaló. Nemzeti Agrárgazdasági Kamara. <http://nak.hu/kamara/kamarai-hirek/orszagos-hirek/97176-a-2018-juniusi-foldgaz-es-villamosenergia-piaci-osszefoglalo> (letöltve: 2019.01.12.)
167. Nedorost, F. (2018): Analysis of heat recovery potential from wastewater: Case study Hradec Cralove. Czech Technical University in Prague Faculty of Civil Engineering. Master Thesis. 119 p. <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/78262/F1-DP-2018-Nedorost-Filip-Filip%20Nedorost%20-%20diplomova%20prace%2020.5.2018.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. (letöltve: 2018.11.13.)
168. Neis, U. - Nickel, K. - Lundén, A. (2008): Improving anaerobic and aerobic degradation by ultrasonic disintegration of biomass. Journal of Environmental Science and Health Part A V. 43:1-5.
169. Németh, K. (2011): Dendromassza-hasznosításon alapuló decentralizált hőenergia-termelés és felhasználás komplex elemzése. Doktori (Ph.D.) értekezés. Pannon Egyetem, Állat- és Agrárkörnyezet-tudományi Doktori Iskola. 151 p.
170. Németh, Zs. – Kárpáti, Á. (2009): Anaerob iszaprohasztás intenzifikálása ultrahanggal. Négy év üzemi tapasztalati a Bambergi tisztítóműben. MASZESZ Konferencia, 2009. május 26-27. Lajosmizse.
171. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (2010): Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terve. 221 p. ISBN 978-963-89328-0-8.
172. Nemzeti Fenntartható Fejlődési Tanács (2013): Nemzeti Fenntartható Fejlődési Keretstratégia. 188 p. ISBN 978-963-08-7737-4.
173. Nowak, O. - Enderle, P. - Varbanov, P. (2015): Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications. Journal of Cleaner Production. 88:125-131.
174. Országos Vízügyi Főigazgatóság (2014): Szennyvíziszap Kezelési és Hasznosítási Stratégia 2014-2023. Készítette az Országos Vízügyi Főigazgatóság megbízásából a "Stratégia 2014" Konzorcium. http://biopsol.hu/files/file/Szennyviziszap_kezelesi_es_hasznositasi_strategia_2018_2023.pdf. (letöltve: 2018. 09. 03.).
175. Öllös, G. (1992): Szennyvíztisztítás I. Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöktovábbképző Intézet.
176. Öllös, G. - Bikfalvi, I. (1991): Csatornázás-szennyvíztisztítás I-II. Aqua Kiadó, Budapest. 1 299 p. ISBN: 963-602-542-8.
177. Ördög, V. (2009): Mikroalgák a mezőgazdaságban és energiatermelésben. In: IV. Regionális Természettudományi Konferencia. Conference paper, Budapest. 6 p.
178. Pálinkó, É. - Szabó M. (2008): Vállalati pénzügyek. Typotex Kiadó Kft., Budapest. 214 p.

- 179.PAN-LNG (2016): LNG lehetséges hazai előállításának biogáz forrásai. IN: Domanovszky, H. (szerk.) (2016): UNDER THE Connecting Europe Facility (CEF) - Transport Sector. PANNON LNG Projekt (1.7. fejezet) Tanulmány. Agreement No. INEA/CEF/TRAN/M2014/1036265. http://www.panlng.eu/wp-content/uploads/2016/06/1_7_PAN-LNG_biogaz.pdf. (letöltve: 2017. 06. 07.)
- 180.Paolini, V. - Petracchini, F. - Segreto, M. - Tomassetti, L. - Naja, N. - Cecinato, A. (2018): Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 53(10):899-906.
- 181.Patel, M. - Zhang, X. - Kumar, A. (2016): Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 53:1486-1499.
- 182.Pauli, G. A. (2010): *The blue economy: 10 years, 100 innovations, 100 million jobs*. Paradigm Publications. 308 p. ISBN-13: 978-0912111902.
- 183.Pérez-Elvira, S. I. - Diez, P. N. - Fdz-Polanco, F. (2006): Sludge Minimization Technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 5(4):375–398.
- 184.Póliska, Cs. (2012): Fás szárú energianövények szerepe kistelepülések hőenergia ellátásában. *Anyagmérnöki Tudományok*. 37(1):331-342.
- 185.Popp, J. - Harangi-Rákos, M. - Gabnai, Z. - Balogh, P. - Antal, G. - Bai, A. (2016): Biofuels and their co-products as livestock feed: global economic and environmental implications. *Molecules*. 21(3):285.
- 186.Popp, J. - Potori, N. (2011): *A biomassza energetikai célú termelése Magyarországon*. Agrárgazdasági könyvek. Agrárgazdasági Kutató Intézet. Budapest. 160 p. ISBN 978-963-491-570-6.
- 187.Posza, B. (2018): *A hazai energiaültetvények, mint megújuló energiaforrások gazdasági vizsgálata*. Doktori (Ph.D.) értekezés. Kaposvári Egyetem Gazdaságtudományi Kar. Kaposvár. 176 p.
- 188.Pszczółkowska, A. - Romanowska-Duda, Z. - Pszczółkowski, W. - Grzesik, M. - Wysokińska, Z. (2012): Biomass production of selected energy plants: Economic analysis and logistic strategies. *Comparative Economic Research*. 15(3):77-103.
- 189.REA (Renewable Energy Association, 2013): *Gasification and Pyrolysis*. http://www.r-e-a.net/upload/rea_gp_leaflet_june2013_final.pdf (letöltve: 2018.01.22.)
- 190.REKK (2009): *Erdészeti és ültetvény eredetű fás szárú energetikai biomassza Magyarországon*. Műhelytanulmány. Corvinus Egyetem Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont, Budapest. 109 p. https://rekk.hu/downloads/projects/wp2009_5.pdf. (letöltve: 2018.03.12.)
- 191.Remy, C. - Boulestreau, M. - Lesjean, B. (2014): Proof of concept for a new energy-positive wastewater treatment scheme. *Water Science and Technology*. 70(10):1709-1716.
- 192.Rénes, J. (2008): Fás szárú energiaültetvények a gyakorlatban I. *Bioenergia*. 3(3):9-12.
- 193.Roos, C. (2010): *Clean Heat and Power Using Biomass Gasification for Industrial and Agricultural Projects*, U.S. Department of Energy. pp. 1-9.
- 194.Samolada, M. C. - Zabaniotou, A. A. (2014): Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*. 34:411-420.

- 195.Sato, T. - Qadir, M. - Yamamoto, S. - Endo, T. - Zahoor, A. (2013): Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. *Agricultural Water Management*. 130:1-13.
- 196.Sekar, N. - Ramasamy, R. P. (2015): Recent advances in photosynthetic energy conversion. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*. 22:19-33. IN: Bai, A. - Popp, J. - Balogh, P. - Gabnai, Z. - Pályi, B. - Farkas, I. - Pintér, G. - Zsiborács, H. (2016): Technical and economic effects of cooling of monocrystalline photovoltaic modules under Hungarian conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 60:1086-1099.
- 197.Sharma, V. - Chandel, S. S. (2013): Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 27:753-767.
- 198.Shen, Y. - Linville, J. L. - Urgun-Demirtas, M. - Mintz, M. M. - Snyder, S. W. (2015): An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 50:346-62.
- 199.Shoener, B. D. - Bradley, I. M. - Cusick, R. D. - Guest, J. S. (2014): Energy positive domestic wastewater treatment: the roles of anaerobic and phototrophic technologies. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 16(6):1204-1222.
- 200.Sickert, E. (1998): Kanalisation im Wandel der Zeit. *Korrespondenz Abwasser*. 45:220-246.
- 201.Simon, L. - Prokisch, J. - Győri, Z. (2000): Effect of municipal sewage sludge compost on the heavy metal accumulation of maize (*Zea mays* L.). *Agrokémia és Talajtan*. 49:247-256.
- 202.Sipos, R. (2012): A szennyvíziszap komposzttal kezelt olasz nád (*Arundo donax* L.) természetessége. Szakdolgozat. Debreceni Egyetem, Gazdálkodástudományi és Vidékfejlesztési Kar, Debrecen. 46 p.
- 203.Skorek-Osikowska, A. - Bartela, Ł. - Kotowicz, J. - Sobolewski, A. - Iluk, T. - Remiorz, L. (2014): The influence of the size of the CHP (combined heat and power) system integrated with a biomass fueled gas generator and piston engine on the thermodynamic and economic effectiveness of electricity and heat generation. *Energy*. 67:328–340.
- 204.Smallley, R. E. (2003): Top Ten Problems of Humanity for Next 50 Years. *Energy & Nano Technology Conference, Rice University, May 3, 2003*. In: Dupcsák Zs. – Marselek S. (2013): Biogáz termelés, mint a környezettudatos energiatermelés lehetősége. *Journal of Central European Green Innovation*. 1(1):35-44.
- 205.Speight, J. G. (2011): Production, properties and environmental impact of hydrocarbon fuel conversion. IN: Khan, M. R. (Ed.). (2011). *Advances in clean hydrocarbon fuel processing: Science and technology*. Elsevier. pp. 54-82.
- 206.Statista (2019): Average annual OPEC crude oil price from 1960 to 2018 (in U.S. dollars per barrel). <https://www.statista.com/statistics/262858/change-in-opec-crude-oil-prices-since-1960/> (letöltve: 2019.01.15.)
- 207.Sütő V. - Homola A. (2009): Szennyvíziszap hasznosítás, elhelyezés jelene és jövője Magyarországon. BÁCSVÍZ Zrt. Csatornaszolgáltatási Ágazat. Tanulmány. 17 p.
- 208.Sydney, E. B. - Sturm, W. S. - de Carvalho, J. C. - Thomaz-Soccol, V. - Larroche, C. - Pandey, A. - Soccol, C. R. (2010): Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresource Technology*. 101:5892–5896.

- 209.Szabó, A. (2016): Természetközeli szennyvíztisztítási technológiák. Előadás anyag. BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék. 98 p.
- 210.Szuhi, A. (2009): Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium. 36 p.
- 211.Tamrakar, A. - Pandey, S. K. - Dubey, S. C. (2015): Hydro Power Opportunity in the Sewage Waste Water. American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics. 10(2):179-183.
- 212.Tan, C. H. - Show, P. L. - Chang, J. S. - Ling, T. C. - Lan, J. C. W. (2015): Novel approaches of producing bioenergies from microalgae: A recent review. Biotechnology Advances. 33(6):1219-1227.
- 213.Téglá, Zs. - Takácsné György, K. - Hágen, I. Zs. (2012): A fás szárú biomassza ellátási logisztikai modellje. LIV. Georgikon Napok Kiadványkötet. A mezőgazdaságtól a vidékgazda(g)ságig. Keszthely, Magyarország. pp. 476-484.
- 214.TESZIR (2018): Szennyvíztisztító telepek. Települési Szennyvíz Információs Rendszer. <http://www.teszir.hu/?module=objektumlista/szennyviztisztito&page=4> (letöltve: 2018.09.20.)
- 215.Thebalance (2019): Oil Price Forecast 2019 - 2050. <https://www.thebalance.com/oil-price-forecast-3306219> (letöltve: 2019.01.20.)
- 216.Thury, P. (2009): Az anaerob iszaprohasztás után keletkező iszapvíz minősége, és annak hatása a tisztítás főágára. Doktori (Ph.D.) értekezés. Pannon Egyetem. Vegyészmérnöki Tudományok és Anyagtudományok Doktori Iskola.
- 217.Topić, D. - Šljivac, D. - Jozsa, L. - Nikolovski, S. - Vukobratović, M. (2010): Cost – benefit analysis of biogas CHP (Combined Heat and Power) Plant. Conference: Science in Practice 2010, 28th International Conference. Proceedings. Subotica, 2010.
- 218.Tóth, J. (2017): Szennyvíziszap termikus ártalmatlanítása és ennek szerepe a körforgásos gazdaság megvalósításában. https://www.bitesz.hu/wp-content/uploads/2017/05/Szennyv%C3%ADziszap-%C3%A9get%C3%A9s_s%C3%93buda-egyetem_2017.pdf. (letöltve: 2018. 06. 05.)
- 219.Tyagi, V. V. - Rahim, N. A. - Rahim, N. A. - Jeyraj, A. - Selvaraj, L. (2013): Progress in solar PV technology: Research and achievement. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 20:443-461.
- 220.Tyagi, V.K. - Lo, S.-L. (2016): Energy and Resource Recovery From Sludge: Full-Scale Experiences. IN: Prasad, M.N.V. - Shih, K. (Eds): Environmental Materials and Waste. Academic Press, 2016. pp. 221-244. ISBN: 9780128038376.
- 221.Uchman, W. (2017): Evaluation of the potential of the production of electricity and heat using energy crops with phytoremediation features. Applied Thermal Engineering. 126:194–203.
- 222.UNESCO (2017): Wastewater. The Untapped Resource. The United Nations World Water Development Report 2017. UNESCO & World Water Assessment Programme. 198 p. ISBN 978-92-3-100201-4.
- 223.UNESCO (2019): The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. 186 p. ISBN:978-92-3-100309-7.
- 224.Vágvölgyi, A. (2013): Fás szárú energetikai ültetvények helyzete Magyarországon napjainkig; Üzemeltetésük, hasznosításuk alternatívái. Doktori (PhD) értekezés. Nyugat-

- Magyarországi Egyetem, Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Biokörnyezettudomány Program. 195 p.
225. Van Den Hende, S. - Vervaeren, H. - Boon, N. (2012): Flue gas compounds and microalgae: (Bio-) chemical interactions leading to biotechnological opportunities. *Biotechnology advances*. 30(6):1405-1424.
226. van Forest, F. (2012): Perspectives for biogas in Europe. Oxford, United Kingdom: Oxford Institute for Energy Studies. 54 p. ISBN 978-1-907555-63-3.
227. Venkatesh, G. - Elmi, R. A. (2013): Economic-environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). *Energy*. 58:220-235.
228. Veres, Z. T. (2015): Hagyományos aktíviszapos szennyvíztisztító telepek fejlesztéseinek potenciális hatékonysága. Doktori (PhD) értekezés. Debreceni Egyetem, Természettudományi Doktori Tanács, Juhász-Nagy Pál Doktori Iskola. 97 p.
229. Vityi, A. - Marosvölgyi, B. (2014): Hagyományos és új agroerdészeti technológiák lehetséges szerepe az Alföld klímaérzékenysége mérséklésében. Alföldi Erdőkért Egyesület 2014. évi őszi Kutatói Napja. Erdő-Mező Online. <http://erdo-mezo.hu/2014/12/25/hagyomanyos-es-uj-agroerdeszeti-technologiak-lehetseges-szerepe-az-alfold-klimaerzekenysegenek-mersekleseben/> (letöltve: 2019. 05. 21.)
230. Wang, L. - Li, Y. - Chen, P. - Min, M. - Chen, Y. - Zhu, J. - Ruan, R. R. (2010): Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*. 101:2623-2628.
231. Weigert, B. (2015): Tisztítóműtől az erőműig. *Vízmű Panoráma*. 23(1):28-29.
232. Wett, B. - Buchauer, K. - Fimml, C. (2007): Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems. IWA Leading Edge Technology Conference. Singapore: Asian Water. pp. 21-24.
233. Wiesmann, U. - Choi, I. S. - Dombrowski, E. M. (2007): Historical development of wastewater collection and treatment. *Fundamentals of biological wastewater treatment*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 391 p. ISBN: 978-3-527-31219-1.
234. Wong, W. (2014): Evaluating the Implications of Sewage Heat Recovery on WWTPs Using a Sewage Heat Energy Balance. https://www.kwl.ca/sites/default/files/WW_20140506_WWTP%20Heat%20Energy%20Balance_FINAL.pdf (letöltve: 2018.03.21.)
235. World Bank (2015): East Asia and Pacific Wastewater to Energy Processes: a Technical Note for Utility Managers in EAP countries. Report No: ACS13221. <http://documents.worldbank.org/curated/en/489941468188683153/pdf/ACS13221-v1-Revised-Box393171B-PUBLIC-Wastewater-to-Energy-Report-Main-Report.pdf> (letöltve: 2019.01.10.)
236. Xie, S. - Wickham, R. - Nghiem, L. D. (2017): Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 116:191-197.
237. Xu, J. - Li, Y. - Wang, H. - Wu, J. - Wang, X. - Li, F. (2017): Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: a case study in eastern China. *Energy Procedia*. 142:3055-3061.
238. Yang, G. - Wang, J. (2017): Fermentative hydrogen production from sewage sludge. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 47(14):1219-1281.

- 239.Zhang, X. (2015): Microalgae removal of CO₂ from flue gas. IEA Clean Coal Centre, UK. 95 p.
- 240.Zsiborács, H. - Pályi, B. - Pintér, G. - Popp, J. - Balogh, P. - Gabnai, Z. - Pető, K. - Farkas, I. - Hegedűsné Baranyai, N. - Bai, A. (2016): Technical-economic study of cooled crystalline solar modules. Solar Energy. 140:227-235.

Internetes források

- Internet 1: A szennyvíztisztítás kialakulása, fejlődése napjainkig. PureAqua Környezetvédelmi Mérnöki Iroda.
https://www.pureaqua.hu/letoltes/technologia/A_szennyviztisztitas_kialakulasa_fejlolese_napjainkig.pdf. (letöltve: 2018. 03. 10.)
- Internet 2: Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2014-2020. https://www.bitesz.hu/wp-content/uploads/2016/11/hulladeggazdalkodasi_terv.pdf. (letöltve: 2017. 02. 01.)
- Internet 3: Az eleveniszapos szennyvíztisztítás részműveletei, méretezésük és kiépítésük - A szennyvíztisztítás beruházási és üzemeltetési költségei.
<http://www.pureaqua.hu/index.php/hu/szolgáltatások/technologia/44-az-eleveniszapos-szennyviztisztitas-reszmuveletei-meretezesuk-es-kiepitesuk?showall=&start=4>. (letöltve: 2015. 03. 10.)
- Internet 4 (2011): Élőgépes szennyvíztisztítási technológia.
<https://felsofokon.hu/kornyezetvedelem/elogepes-szennyviztisztitasi-technologia/>. (letöltve: 2016. 10. 10.)
- Internet 5:
http://www.epito.bme.hu/vcst/oktatas/feltoltesek/BMEEOVKIK10/regionalis_kozmurend-szerek_silabusz_jav.pdf. (letöltve: 2015. 02. 15.)
- Internet 6: <http://www.kornyezetvedelem.bme.hu/node/259>. (letöltve: 2015. 02. 20.)
- Internet 7: Tóvári P. – Bácskai I. – Csitári M. – Madár V.: Biomassza tüzelőanyagok termokémiai hasznosíthatóságának vizsgálata.
<http://www.greenfo.hu/uploads/dokumentumtar/biomassza-tuzeloanyagok-termokemiai-hasznosithatosaganak-vizsgalata.pdf> (letöltve: 2018.10.20.)
- Internet 8 (2019): <http://ikragrar.hu/on-is-nitraterzekeny-teruleten-gazdalkodik/> (letöltve: 2019.01.05.)
- Internet 9: CNGPORT. <http://www.cngport.hu/tudastar/a-cng-es-a-fizika.html> (letöltve: 2018.09.10.)
- Internet 10: Gases – Densities. https://www.engineeringtoolbox.com/gas-density-d_158.html (letöltve: 2019.05.21.)
- Internet 11: Biomethane-Calculator. IEE Projekt Biometán Régiók által kifejlesztve.
http://bio.methan.at/en/download_biomethane-calculator (letöltve: 2018.05.05.)
- Internet 12: <http://www.mnnsz.hu/wp-content/uploads/2014/04/500-kWp-magyarorsz%C6%F3gi-napelemes-er%91'm%91+beruh%C6%F3z%C6%F3s-bemutat%C6%F3sa-beruh%C6%F3z%C6%88i-szemmel-4-v.pdf> (letöltve: 2019.01.10.)
- Internet 13: <http://zerovillanyszamla.hu/listaarak/> (letöltve: 2019.01.10.)
- Internet 14: Hálózatra visszatápláló napelemes rendszerek.
<http://naplopo.hu/rendszerek/napelemes-rendszerek> (letöltve: 2019.01.10.)

Internet 15: Napelemes rendszerek.

<https://napelemmindenki.hu/kategoria/napelemesrendszer/> (letöltve: 2019.01.10.)

Internet 16: Ace Solar Business napelemes rendszer árak. <https://www.napelemek.net/ace-solar-business-napelemes-rendszer-arak/> (letöltve: 2019.01.10.)

Internet 17: Indikatív árajánlat. <https://renasolar.hu/arak.html>. (letöltve: 2019.01.10.)

Internet 18:

http://www.morahalom.hu/morahalom_499_5_kw_teljesitmenyu_napelemes_kiseromu_telepitesi (letöltve: 2019.01.10.)

Internet 18: Napelem inverter ár. <https://nvsolar.hu/napelem-inverter-ar/> (letöltve: 2019.01.10.)

Internet 20: Fertilizers Europe. Carbon footprint reference values. Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European mineral fertilizer production and use.

https://www.fertilizerseurope.com/fileadmin/user_upload/publications/agriculture_publications/carbon_footprint_web_V4.pdf (letöltve: 2018.11.10.)



Nyilvántartási szám: DEENK/255/2019.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Gabnai Zoltán
Neptun kód: G5WSSP
Doktori Iskola: Ihrig Károly Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10051638

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Folyóiratcikkek, tanulmányok (9)

1. Bai, A., **Gabnai, Z.**: The possible role of large-scale sewage plants in local transport.
In: Transportation, IntechOpen, London, United Kingdom, "Közlésre elfogadva", 1-24, 2019.
ISBN: 9789535168775
2. Nagy, D., Balogh, P., **Gabnai, Z.**, Popp, J., Oláh, J., Bai, A.: Economic Analysis of Pellet Production in Co-Digestion Biogas Plants.
Energies, 11 (5), 1-21, 2018. EISSN: 1996-1073.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en11051135>
IF: 2.676 (2017)
3. **Gabnai, Z.**: Energy alternatives in large-scale wastewater treatment.
Apstract, 11 (3-4), 141-146, 2017. ISSN: 1789-221X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.19041/APSTRACT/2017/3-4/19>
4. Bai, A., Popp, J., Pető, K., Szőke, I., Harangi-Rákos, M., **Gabnai, Z.**: The Significance of Forests and Algae in CO2 Balance: a Hungarian Case Study.
Sustainability, 9, 857, 2017. ISSN: 2071-1050.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su9050857>
IF: 2.075
5. **Gabnai, Z.**, Gál, B. S.: A szennyvíziszap-hasznosítás energetikai és egyéb lehetőségei.
Journal of Central European Green Innovation, 4 (1), 13-30, 2016. ISSN: 2064-3004.
6. Bai, A., Popp, J., Balogh, P., **Gabnai, Z.**, Pályi, B., Farkas, I., Pintér, G., Zsiborács, H.: Technical and economic effects of cooling of monocrystalline photovoltaic modules under Hungarian conditions.
Renewable & Sustainable Energy Reviews, 60, 1086-1099, 2016. ISSN: 1364-0321.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.003>
IF: 8.05





7. Zsiborács, H., Pályi, B., Pintér, G., Popp, J., Balogh, P., **Gabnai, Z.**, Pető, K., Farkas, I., Hegedűsné, B. N., Bai, A.: Technical-economic study of cooled crystalline solar modules. *Solar Energy*. 140, 227-235, 2016. ISSN: 0038-092X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.009>
IF: 4.018
8. **Gabnai, Z.**: A faapriték-termelés és az önkormányzati energia-gazdálkodás rendszerszemléletű gazdasági elemzése esettanulmány alapján.
Gazdálkodástudományi Közlemények. 3 (1), 57-63, 2011. ISSN: 2061-2443.
9. **Gabnai, Z.**: Rövid vágásfordulójú nemesnyár energiaültetvények gazdasági értékelése Hajdú-Bihar megyében.
Gazdálkodástudományi Közlemények. 3 (1), 19-25, 2011. ISSN: 2061-2443.

Konferenciaközlemények (3)

10. **Gabnai, Z.**, Bai, A.: A szennyvíztisztítás és a hajtóanyagcélú biogáz-hasznosítás.
In: Felmelegedés Ökolábnym Élelmiszerbiztonság : LVIII. Georgikon Napok. 2016. szeptember 29-30, Keszthely. Szerk.: Nagy Zita Barbara, Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, 111-115, 2016. ISBN: 9789639639850
11. Bai, A., **Gabnai, Z.**: Energianyeréssel kombinált innovatív szennyvízkezelési eljárások.
In: LVI. Georgikon Napok, Nemzetközi Tudományos Konferencia: Programfüzet, Pannon Egyetem, Georgikon Kar, Keszthely, 25-34, 2014. ISBN: 9789639639591
12. **Gabnai, Z.**: Innovatív szennyvíztisztítási módszerek komplex elemzése.
In: Környezettudatos energiatermelés és -felhasználás : III. Környezet és Energia Konferencia. Szerk.: Szabó Valéria, Fazekas István, MTA DAB Megújuló Energetikai Munkabizottság, Debrecen, 160-165, 2014. ISBN: 9789637064319

További közlemények

Folyóiratcikkek, tanulmányok (10)

13. **Gabnai, Z.**, Müller, A. É., Bács, Z., Bácsné Bába, É.: A fizikai inaktivitás nemzetgazdasági terheit.
Egészségfejlesztés. 60 (1), 20-30, 2019. ISSN: 1786-2434.
DOI: <http://dx.doi.org/10.24365/ef.v60i1.308>
14. Müller, A. É., Bolega, S., **Gabnai, Z.**, Bácsné Bába, É., Pfau, C.: A BMX, és egyéb extrém sportok választásának motivációs tényezői.
International Journal of Engineering and Management Sciences. 3 (4), 426-441, 2018.
EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.4.35>





15. Müller, A. É., Pfau, C., **Gabnai, Z.**, Bácsné Bába, É., Borbély, A., Pető, K.: A gyógy-, wellness- és sportszolgáltatások fejlesztési lehetőségei a gyógyturizmusban egy hazai kutatás tükrében. *International Journal of Engineering and Management Sciences*. 3 (4), 101-114, 2018. EISSN: 2498-700X. DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2018.4.10>
16. Müller, A. É., **Gabnai, Z.**, Pfau, C., Pető, K.: A magyarok táplálkozási szokásainak és tápláltsági állapotának jellemzői: szakirodalmi áttekintés. *Táplálkozásmarketing*. 5 (2), 45-55, 2018. EISSN: 2064-8839. DOI: <https://doi.org/10.20494/TM/5/2/4>
17. Zsiborács, H., Bai, A., Popp, J., **Gabnai, Z.**, Pályi, B., Farkas, I., Hegedűsné, B. N., Veszelka, M., Zentkó, L., Pintér, G.: Change of real and simulated energy production of certain photovoltaic technologies in relation to orientation, tilt angle and dual-axis sun-tracking. A case study in Hungary. *Sustainability*. 10 (5), 1394, 2018. EISSN: 2071-1050. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10051394> IF: 2.075 (2017)
18. Zsiborács, H., Pintér, G., Bai, A., Popp, J., **Gabnai, Z.**, Pályi, B., Farkas, I., Hegedűsné, B. N., Gützer, C., Trimmel, H., Oswald, S., Weihs, P.: Comparison of thermal models for ground-mounted south-facing photovoltaic technologies: a practical case study. *Energies*. 11 (5), 1114-1-18, 2018. EISSN: 1996-1073. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en11051114> IF: 2.676 (2017)
19. Kurucz, E., Fári, M., Antal, G., **Gabnai, Z.**, Popp, J., Bai, A.: Opportunities for the production and economics of Virginia fanpetals (*Sida hermaphrodita*). *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 90, 824-834, 2018. ISSN: 1364-0321. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.007> IF: 9.184 (2017)
20. **Gabnai, Z.**, Bai, A.: Városi szennyvíztelepek energetikai önellátása. In: Arcsall vagy háttal a jövőnek? : 60 éves a Georgikon Napok Konferencia. Szerk.: Csányi Szilvia, Pannon Egyetem, Keszthely, 510-514, 2018. ISBN: 9789639639928
21. Mézes, L., Bai, A., Nagy, D., Cinka, I., **Gabnai, Z.**: Optimization of Raw Material Composition in an Agricultural Biogas Plant. *Trends in Renewable Energy*. 3 (1), 61-75, 2017. ISSN: 2376-2136. DOI: <http://dx.doi.org/10.17737/tre.2017.3.1.0031>
22. Popp, J., Harangi-Rákos, M., **Gabnai, Z.**, Balogh, P., Antal, G., Bai, A.: Biofuels and Their Co-Products as Livestock Feed: Global Economic and Environmental Implications. *Molecules*. 21 (3), 285-1-26, 2016. EISSN: 1420-3049. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules21030285> IF: 2.861





Konferenciaközlemények (2)

23. Bai, A., Szőke, I., Nagy, D., **Gabnai, Z.**: Mezőgazdasági üzemek biomassza-alapú energetikai önellátása.

In: LIX. Georgikon Napok Nemzetközi Tudományos Konferencia 2017. szeptember 28-29., PE Georgikon Kar, Keszthely. Szerk.: Nagy Zita Barbara, Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, 8-14, 2017.

24. **Gabnai, Z.**: Mezőgazdasági melléktermék-hasznosításon alapuló élelmiszer- és energiatermelés lehetőségei kisüzemi méretekben.

In: LVII. Georgikon Napok. Szerk.: Nagy Zita Barbara, Pannon Egyetem, Georgikon Kar, Keszthely, 122-129, 2015. ISBN: 9789639639829

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 33,615

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
16,819**

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2019.06.06.



TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A szennyvíztisztítási technológiák csoportosítása.....	14
2. táblázat: A szennyvíztisztítási technológiák összehasonlítása.....	16
3. táblázat: Hazai szennyvízhő-hasznosítási projektek	22
4. táblázat: A hazai energiaültetvényeken mért hozam-intervallumok.....	27
5. táblázat: A termokémiai konverzió technológiái	29
6. táblázat: A települések szennyvíztisztítására vonatkozó technológiai határértékek.....	35
7. táblázat: Az alkalmazott módszerek összefoglalása	40
8. táblázat: Az alkalmazott dinamikus beruházás-gazdaságossági mutatók.....	41
9. táblázat: Az egyes alaptermotechnológiák kiegészítő lehetőségei.....	49
10. táblázat: Az egységmértű telepre érkező szennyvíz és kifolyó tisztított víz tápanyag-tartalma.....	50
11. táblázat: Kogenerációs energiatermelés és -önellátás, valamint a többlet hőenergia értékesítése	53
12. táblázat: Az elérhető megtakarítások és árbevételek a biogáz-hasznosítás céljának függvényében	54
13. táblázat: Nyár energiaültetvény ráfordításai, költségei két egymást követő évben 1-1 ha-on történő telepítésnél, 2 éves vágásfordulóval	58
14. táblázat: Az ültetvény gazdaságossági mutatói.....	60
15. táblázat: A szállítási távolság hatása az energiamérlegre és az NPV-re	60
16. táblázat: A kezdeti aprítékhozam hatása az energiamérlegre és az NPV-re	61
17. táblázat: A villamosenergia-önellátásra méretezett rendszer megtérülési mutatói	62
18. táblázat: A villamos energia- és hőenergia árak hatása a nettó jelenértékre (1. rendszer). 63	
19. táblázat: A bevételeket/megtakarításokat és költségeket tartalmazó diszkontált cash-flow a gázosító+CHP erőműnél (M.e.: millió Ft)	64
20. táblázat: A teljes aprítékmenyiségre méretezett rendszer megtérülési mutatói	65
21. táblázat: A villamosenergia- és hőenergia árak hatása a nettó jelenértékre (2. rendszer) . 65	
22. táblázat: A napelemes rendszer főbb paraméterei.....	67
23. táblázat: Az energia-önellátáshoz szükséges napelemes rendszer gazdaságossági mutatói	68
24. táblázat: Az 50.000 LEÉ energia-önellátáshoz szükséges napelemes rendszer gazdaságossági mutatói.....	69
25. táblázat: A kogenerációból származó füstgáz és tisztított víz algás hasznosítása	70
26. táblázat: A kommunális tisztító telep kapacitása és az energia-önellátás számított mutatói	72
27. táblázat: Egy 100.000 LEÉ terhelésű tisztító telep lehetőségei az energia-, tápanyag- és CO ₂ -gazdálkodás terén (egy évre vetítve)	73
28. táblázat: A kogenerációval és energianövényes energiatermeléssel megtakarítható CO ₂ a jelenleg iszaprothasztást alkalmazó telepeken	74
29. táblázat: A kogenerációs, valamint a komposzthasznosítással egybekötött faaprítéktermelés és -felhasználás CO ₂ -megtakarítás jelentősége a hazai bruttó éves CO ₂ -kibocsátásban	75

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A hulladékgazdálkodás hierarchiája	11
2. ábra: A kommunális szennyvíztisztítókból származó szennyvíziszap ártalmatlanításának módjai az EU országaiban	12
3. ábra: Nyitott és zárt anyagciklusú rendszerek	18
4. ábra: A biomassza felhasználásának módjai a konverzió típusa szerint	28
5. ábra: Nitrát-érzékeny területek Magyarországon	36
6. ábra: A szennyvíztisztítási tevékenység alapfunkciója és kiegészítő lehetőségei	38
7. ábra: A számítások menete	39
8. ábra: A szennyvízre alapozott körfolyamat lehetőségei	51
9. ábra: Az energiaültetvény becsült hozama (abszolút száraz tonna/ha/betakarítás).....	57

MELLÉKLETEK

I. SZ. MELLÉKLET: A szennyvíztisztítással és szennyvíziszap-felhasználással kapcsolatos legfontosabb EU-s és hazai előírások

EU-s irányelvek, ajánlások

- EU Víz Keretirányelv
- 91/271/EGK irányelve a települési szennyvíz kezeléséről
- 86/278/EGK irányelv a szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználásáról

Hazai jogszabályok, előírások és tervdokumentumok

- Vízgyűjtő Gazdálkodási Terv
- Nemzeti Települési Szennyvízelvezetési és -tisztítási Megvalósítási Program
- Szennyvíziszap Kezelési és Hasznosítási Stratégia (2018-2023)
- 220/2004. (VII.21.) Korm. rendelet a felszíni vizek minősége védelmének szabályairól
- 2003. évi LXXXIX. törvény a környezetterhelési díjról
- 2012. évi CLXXXV. törvény a hulladékról: A hulladékstátusz megszűnése
- 50/2001. (IV. 3.) Kormányrendelet (és az azt módosító 40/2008 (II.26.) Korm. rendelet) a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól
- 59/2008. (IV. 29.) FVM rendelet a vizek mezőgazdasági eredetű nitrátszennyezéssel szembeni védelméhez szükséges cselekvési program részletes szabályairól, valamint az adatszolgáltatás és nyilvántartás rendjéről
- 90/2008. (VII. 18.) FVM rendelet a talajvédelmi terv készítésének részletes szabályairól
- 36/2006. (V. 18.) FVM rendelet a termélnövelő anyagok engedélyezéséről, tárolásáról, forgalmazásáról és felhasználásáról.

II. SZ. MELLÉKLET: A nyár energiaültetvény gazdaságossági mutatóinak számításához tartozó cash-flow értékek

KIADÁS, TEV. MEGNEVEZÉS (ezer Ft)	Évek														
	1. év	2. év	3. év	4. év	5. év	6. év	7. év	8. év	9. év	10. év	11. év	12. év	13. év	14. év	15. év
Termőhely-feltárás és talajelőkészítés	61	61													
Szaporítóanyag és gépi ültetés		319	319												
Gyomirtás, növényvédelem		30	30												
Sorközművelés		16	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Szennyvíziszap komposzt és -kijuttatás, bevizsgálás		113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113	113		
Műtrágya és -kijuttatás megtakarítás		-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68	-68		
Betakarítás és szállítás			154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	
Ültetvény felszámolása														100	100
KÖLTSÉGEK ÖSSZESEN (ezer Ft)	61	470	571	222	231	231	239	239	232	232	226	226	222	277	124
Hozam (atrotonna)	0	0	16,0	16,0	20,3	20,3	24,4	24,4	21,1	21,1	18,2	18,2	16,0	16,0	
BEVÉTELEK ÉRTÉKESÍTÉSBŐL (ezer Ft)			339	339	457	457	583	583	536	536	490	490	456	456	
CASH-FLOW	-61	-470	-232	118	227	227	344	344	303	303	264	264	235	179	-124
DISZKONTÁLT CASH-FLOW	-61	-433	-197	92	163	150	210	194	157	145	116	107	88	62	-39

Forrás: saját számítás saját adatgyűjtés és NÉMETH (2011), GABNAI (2011), AGROTREND (2017), POSZA (2018) alapján

Jellemző paraméterek:

- Apríték értékesítési ára: 20 000 Ft/a.t.

III. SZ. MELLÉKLET: Az energia-önellátáshoz szükséges napelemes rendszer gazdaságossági mutatóinak számításához tartozó cash-flow értékek

	Évek																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Beruházási költség (M Ft)	271,6															40,7															
Működési költség (M Ft)	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7	4,8	5,0	5,1	5,3	5,7	6,2	6,8	7,3	8,0	8,6	9,4	10,2	11,1	12,0	13,0	14,2	15,4	16,7	18,1	
KÖLTSEGEK ÖSSZESEN (M Ft/év):	275,1	3,6	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,6	4,7	4,8	5,0	5,1	5,3	46,4	6,2	6,8	7,3	8,0	8,6	9,4	10,2	11,1	12,0	13,0	14,2	15,4	16,7	18,1	
ENERGIA MEGTAKARÍTÁS (M Ft/év)	31,6	32,4	33,2	34,0	34,9	35,7	36,6	37,5	38,4	39,4	40,3	41,3	42,4	43,4	44,5	48,0	51,8	56,0	60,4	65,2	70,4	76,0	82,0	88,5	95,6	103,2	111,3	120,2	129,6	140,0	
CASH-FLOW	-243,5	28,8	29,5	30,2	30,9	31,7	32,4	33,2	34,0	34,8	35,6	36,5	37,4	38,3	39,2	1,5	45,6	49,2	53,1	57,2	61,7	66,6	71,8	77,5	83,6	90,1	97,2	104,8	113,0	121,9	
DISZKONTÁLT CASH-FLOW	-243,5	26,5	25,0	23,6	22,3	21,0	19,8	18,7	17,6	16,6	15,7	14,8	14,0	13,2	12,4	0,4	12,3	12,2	12,1	12,0	12,0	11,9	11,8	11,7	11,7	11,6	11,5	11,4	11,3	11,2	

Forrás: saját számítás

NYILATKOZAT

Alulírott, Gabnai Zoltán (szül.: Debrecen, 1988. 02. 29.) büntetőjogi és fegyelemi felelősségem tudatában kijelentem és aláírással igazolom, hogy a doktori (Ph.D) fokozat megszerzése céljából benyújtott értekezésem kizárólag saját, önálló munkám.

Nyilatkozom továbbá, hogy:

- az Ihrig Károly Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola szabályzatát megismertem, és az abban foglaltak megtartását magamra nézve kötelezően elismerem;
- a felhasznált irodalmat korrekt módon kezeltem, a disszertációra vonatkozó jogszabályokat és rendelkezéseket betartottam;
- a disszertációban található másoktól származó, nyilvánosságra hozott vagy közzé nem tett gondolatok és adatok eredeti leőhelyét a hivatkozásokban, az irodalomjegyzékben, illetve a felhasznált források között hiánytalanul feltüntettem a mindenkori szerzői jogvédelem figyelembevételével;
- a benyújtott értekezéssel azonos, vagy részben azonos tartalmú értekezést más egyetemen, illetve doktori iskolában nem nyújtottam be tudományos fokozat megszerzése céljából.

Debrecen, 2019. 06. 10.

Gabnai Zoltán

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném hálámat és köszönetemet kifejezni témavezetőmnek, Dr. Bai Attila egyetemi tanárnak doktori kutatómunkám során nyújtott szakmai és emberi segítségéért, baráti támogatásáért. Áldozatos segítségnyújtása nélkül nem jöhetett volna létre jelen munka.

Köszönettel tartozom a Gazdálkodástudományi Intézet korábbi és jelenlegi vezetőinek, Dr. Nábrádi András Professzor Úrnak és Dr. Szűcs István Docens Úrnak, valamint az Ihrig Károly Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola korábbi és jelenlegi vezetőinek, Dr. Popp József Professzor Úrnak és Dr. Balogh Péter Professzor Úrnak segítségükért és támogatásukért. Hálás vagyok kollégáimnak és munkahelyi barátaimnak segítségnyújtásukért, hasznos tanácsaikért.

Külön köszönet illeti opponenseimet, Dr. Takács István Professzor Urat, Dr. Vityi Andrea Docens Asszonyt és Dr. Kiss Tibor Docens Urat a disszertációm bírálata során adott hasznos és előremutató tanácsaikért, jobbitó szándékú kritikai észrevételeikért. Hálásan köszönöm Dr. Huzsvai László, Dr. Szunyog István és Dr. Farkas Ferenc Docens Urak szakmai segítségét és építő jellegű javaslatait, továbbá Dr. Szakály Zoltán Professzor Úr támogatását. Hálás vagyok az üzemi adatgyűjtés során meglátogatott telepek illetékeseinek, valamint a kutatómunka egészét végig kísérő szakmai konzultációkért a szennyvízágazati szakértőknek, különösen a Debreceni Vízmű rendkívül segítőkész munkatársainak.

Végezetül köszönöm Szüleimnek és Testvéremnek, hogy minden téren támogattak az idáig vezető úton, és köszönettel tartozom Feleségemnek, hogy végtelen türelemmel és megértéssel kísért végig kutatómunkámon.