

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet szeretnénk mondani a Soproni Vízmű Zrt-nek, hogy a rendelkezésünkre bocsájtották a hálózatok adatait kutatási célokra. A cikkben bemutatott munka az NKFI OTKA K-135436 "Biztonságos ivóvízellátó rendszerek" kutatási projekt keretében valósult meg.

► IRODALOMJEGYZÉK

SZERZŐ:



Wéber Richárd: 1992-ben született Pécsen. 2015-ben szerezte BSc diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Karán, míg ugyanitt 2017-ben az MSc-t. Ezután kezdte kutatását a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszéken PhD hallgatóként, disszertációjának címe „Sebezhetőség és szenzorhelyezés ivóvízhálózatokban”, témavezetője Dr. Hős Csaba, egyetemi docens. Az értekezését 2021 áprilisában nyújtotta be, a hivatalos védelem várhatóan 2021 nyarán lesz. A tanszéken már évtizedes múltra tekint vissza a különböző csőhálózatok vizsgálata, elsősorban ivóvízhálózatok állnak a fókuszban. A vizsgálatok során a cél az utóbbi évtizedek komplex hálózati elemzési eszközök alkalmazása ivóvízhálózatok esetén. Eddig 5 nemzetközi folyóirat cikket (köztük 3 impakt faktorral rendelkezőt) és 7 nemzetközi konferenciakiadványt jegyezhet magáénak.

SÓMENTESÍTÉSI MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÓ ÉRTÉKELÉSE ÉLETCIKLUS ELEMZÉSEL: FORDÍTOTT OZMÓZIS ÉS TERMIKUS ELJÁRÁSOK

DULOVICS SZIMPÓZIUM -INNOVÁCIÓS DÍJ

DO THI HUYEN TRANG, TÓTH ANDRÁS JÓZSEF

BME-VBK KÉMIAI ÉS KÖRNYEZETI FOLYAMATMÉRNÖKI TANSZÉK, KÖRNYEZETI ÉS FOLYAMATMÉRNÖKI KUTATÓCSOPORT

Kulcsszavak:

Sómentesítés, Fordított ozmózis (RO), Többfokozatú gyors desztilláció (MSF), Többszörös hatású desztilláció (MED)

Napjainkban az ivóvízhiány egyre nagyobb méreteket ölt, elsősorban a gyors népességnövekedés, az éghajlatváltozás, a pazarló túlhasználat és a szennyezés miatt. A jelenlegi körülmények között a világ lakosságának egynegyede nem jut jó minőségű ivóvízhez. Sőt, 2050-re a világ népességének fele, akár 5 milliárd ember is érintett lehet. Ezért más megoldást kell alkalmazni azokon a területeken, ahol nincs elegendő édesvíz. Az egyik lehetséges irány a tengervíz sóatlanítása, amely az egyik legpraktikusabb megoldás az ivóvízhiány problémájának megoldására a csekély édesvízkészlettel rendelkező olajkitermelő, gazdag országok esetében.

A három leggyakrabban alkalmazott sómentesítési technológia a fordított ozmózis (RO), a többfokozatú gyors desztilláció (MSF) és a többszörös hatású desztilláció (MED). Két módszer alapján vizsgáltuk a tengervíz sóatlanítását: életcikluselemzést (LCA) végeztünk a SimaPro Life Cycle Analysis szoftver 9.1-es verziójával, illetve karbonlábnyom (carbon footprint) elemzést készítettünk. A három sómentesítési technológia esetében elemeztük a fosszilis és megújuló energiaforrásokkal előállított ivóvíz üvegházhatásúgáz-kibocsátását (ÜHG). Ennek eredményeként megállapítottuk, hogy az RO-technológia CO₂-kibocsátása jelentősen alacsonyabb, mint a termikus technológiáké (MSF és MED). Az RO kombinálása megújuló energiával minősült a leginkább környezetbarátnak; kiemelkedő előnyöket biztosít az emberi egészség és az ökoszisztéma minősége szempontjából. Ez a technológia a jövőben még fejlődhet a hosszabb élettartamú, olcsóbb membránok előállításával, továbbá a folyamat energiaigénye a modern energia-visszanyerő rendszerek alkalmazásával még alacsonyabb lehet.

1. BEVEZETÉS

A Föld felszínének mintegy 71%-át borítja víz, ennek csak egy kis része tekinthető iható víznek, azaz a Föld vízkészletének 2,5%-a. Összességében a vízkészletek alig 0,7%-a áll az emberek rendelkezésére¹. Ebből a mennyiségből kell kielégítenünk a jelenleg élő 7,9 milliárd ember egyre növekvő vízfogyasztását (150-400 L/fő naponta²). A növekvő vízfogyasztás mellett az emberi népesség várhatóan növekedni fog³. A Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet (Organisation for Economic Co-operation and Development-OECD) előrejelzése szerint 2050-re a lakosság mintegy 40%-a vízhiányos régiókban fog élni⁴. Nehéz elképzelni, hogy a Földön élő emberek több mint felének nem lesz hozzáférése tiszta, iható vízhez. Azokon a területeken, ahol nincs elég elérhető édesvízforrás, más megoldást kellett találni. A tengervíz sómentesítésének folyamata hatékony alternatívának bizonyult.

A sómentesítési technológiákat először a második világháború alatt alkalmazták nagyobb léptékben a Közel-Keleten, az általános vízhiány miatt. A népesség növekedésével és az ivóvízkészlet csökkenésével egyre szélesebb körben terjedtek el^{5, 6}. Világszerte a sómentesítő üzemek száma 2010 óta évente átlagosan mintegy 6,8%-kal nő, az átlagos éves kapacitásbővülés pedig mintegy 4,6 millió m³/nap. 2020 februárjában 20971 sómentesítési projekt volt 16876 üzembe helyezett létesítménnyel, amelyek kapacitása 97,2 millió m³/nap édesvíztermelés⁷. Napjainkban már több mint 150 ország alkalmazza a sómentesítési technológiákat, amelyekkel mintegy 300 millió ember számára biztosítanak tiszta vizet⁸. A sómentesítő üzemek világszerte a tengerpartok mentén összpontosulnak. A part menti sómentesítő üzemek általában nagyobbak, mint a szárazföldön lévő

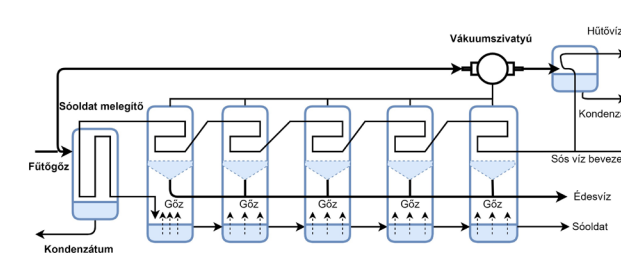
sómentesítő üzemek. A legnagyobb sómentesítési kapacitás ott van, ahol a legnagyobb a kőolaj elérhetősége (a legtöbb sómentesítő üzem fosszilis tüzelőanyagokat használ), például az Egyesült Államokban és Észak-Afrikában.

A sómentesítési technológia ivóvizet biztosít az emberek számára olyan helyeken is, ahol az ivóvíz egyébként problémát jelentene. A termelt víz öntözésre is felhasználható, például a száraz és aszályos területeken, ami csökkentheti egy adott terület importfüggőségét, hozzájárulhat a helyi gazdasághoz és az élelmiszerellátás javításához^{9, 10}. Évtizedek óta bevált és működő technológiákat alkalmaz, ami megbízható eljárás. Azonban több hátrányos tulajdonsága is lehet működésük közben a sómentesítési üzemeknek, például a kibocsátott sósvíz, illetve üvegházhatású gázok, továbbá a mérgező vegyi anyagok kibocsátása, a vízkivételi tevékenységek és a magas energiafogyasztás stb.

A sómentesítés lényegében egy olyan folyamat, amelynek során az édesvizet elválasztják a brakk- vagy sós vízből. Ehhez a folyamathoz energiára (hő-, illetve villamos energia) van szükség. A sómentesítési technológiákat két fő csoportra oszthatjuk: termikus eljárások (hagyományos technológia) és membrános eljárások (modern technológia). A termikus- és membrános eljárások tulajdonságait az. táblázat foglalja össze. A felsorolt sómentesítési technológiák közül a három leggyakrabban alkalmazott: fordított ozmózis (RO), többfokozatú gyors desztilláció (Multi-Stage Flash Distillation, MSF) és többszörös hatású desztilláció (Multiple-Effect Distillation, MED)^{11, 12}. Mára az RO által végzett sómentesítés a technológiák 69%-át teszi ki a világ teljes telepített sómentesítési kapacitásában (65,5 millió m³/nap).

Osztályozás	Termikus	Membrán
Sómentesítési technológia	MED, MSF	RO
Elválasztási mechanizmus	Fázisváltozás	Oldódás-Diffúzió
Az energiaigény fő típusa	Termikus/hő	Elektromos
Hajtóerő	Hő	Nyomás/elektromos
Fajlagos energiafogyasztás	Magas	Alacsony

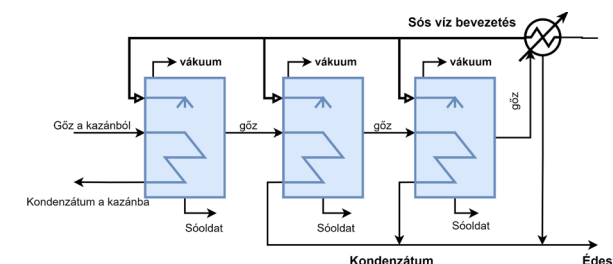
1. táblázat. A sómentesítési technológiák áttekintése¹³.



1. ábra. A többszörös hatású desztilláció (MED) sématis diagramja¹⁵.

A termikus eljárás során fázisváltozás történik, amelyben a betáplált vizet üzemi hőmérsékleten és nyomáson melegítik. A vízgőz a tiszta vízhez hasonlóan lecsapódik, sót és más nem illékony anyagokat hagyva maga után. A termikus folyamatok hő- és mechanikai energia felhasználása nagyobb a membrános eljárásokhoz képest. A legtöbb műveleti folyamat több lépésből áll. A hőújrafelhasználása az egymás utáni kondenzációs és párologtatási folyamatokon keresztül történik¹⁴.

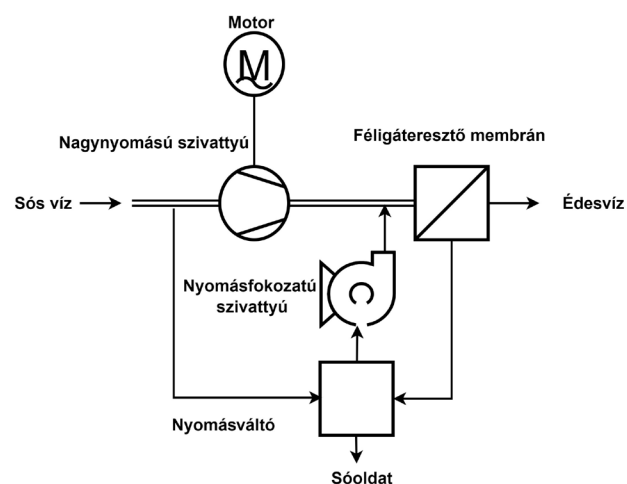
A MED és MSF desztilláció elméleti működését az 1. és 2. ábra mutatja. A MED-ben az egyes fokozatok gőzei a következő egymást követő szakaszban kondenzálódnak. A forró csöveket ezután



2. ábra. A többfokozatú gyors desztilláció (MSF) sématis diagramja¹⁵.

tengervízzel permetezik, hogy a víz elpárologjon; ezt a folyamatot megismételjük a következő szakaszban. A sóoldatot az egyes szakaszok alján összegyűjtik, és a következő szakaszban keringetik, vagy kivezetik a rendszerből¹⁵. Az MED egységeket többféleképpen lehet elhelyezni, a hőcserélők típusától (vízszintes vagy függőleges), a sóoldat vagy a gőz áramlási irányától (előre, hátra, párhuzamos) stb. függően. Az energiahatékonyság érdekében a gőzt általában erőmű gőzturbinájából szívják el, vagy más ipari folyamatokból származó hulladékenergiákat hasznosítanak. Az MSF szintén hőátadáson alapuló sómentesítési technológia, amely a víz elpárologtatásából és kondenzációjából álló, energiaigényes folyamat. A párologtató

és kondenzációs lépések több lépcsőben kapcsolódnak egymáshoz, így a párolgás látens hőjét a bejövő víz előmelegítésével nyerik vissza. Az eljárás elve az, hogy a sós víz elpárolog, a víz és a só szétválasztható. A párolgás többször (akár 15-20-szor) történik sorba kapcsolt kamrákban és alacsony nyomáson, így a víz alacsonyabb hőmérsékleten forr¹⁶. Az MSF a leginkább elterjedt termikus sómentesítő eljárás. Előnye, hogy alkalmazása során csak néhány adalékanyagot igényel. A korrózió azonban nagyon gyakori jelenség, ha nem rozsdamentes acélt használnak.



3. ábra. A RO sematikus diagramja¹⁷.

A fordított ozmózis eljárásnál a víz folyékony fázisban marad, és féligáteresztő membránok segítségével választják el a vizet, illetve a sót a tápvíztől. A folyamat során a tengervíz átnyomja a membránra, és a só a membrán mögött marad. A nyomást a nagyobb koncentrációjú oldatra alkalmazzuk, így az oldószer az ozmózissal ellentétben, a kisebb koncentrációjú oldat felé áramlik. Ez tiszta vizet, illetve sókoncentrátumot eredményez. Előnye, hogy magas a visszanyert tiszta víz és az ehhez felhasznált tengervíz mennyisége, és nemcsak a sót, hanem az egyéb káros anyagokat is kiszűri¹⁸. Hátránya azonban a membránok

estleges eltömődése, illetve a sokszor magas külső nyomás alkalmazásának szükségessége¹⁴. Az RO elméleti működését a 3. ábra mutatja. A szilárd anyagok eltávolítását célzó előkezelés után a tengervízet egy nagynyomású szivattyú (High Pressure Pump-HPP) sűríti az RO sómentesítő egység ellátására. Az RO keresztáramlásban valósul meg úgy, hogy a betáplált áram a membrán felületével párhuzamosan áramlik, miközben a keverék egyes komponensei áthaladnak a membránon és elhagyják a permeátum oldalát. A betáplálás iránya csökkenti a koncentráció polarizáció lehetőségét, mivel a betápláló áram lemosa a szűrt molekulákat a membrán felületéről¹⁹. A sómentesítés teljes energiafogyasztása csökkenthető a membrán tulajdonságainak javításával és/vagy egy további energia-visszanyerő rendszerrel, amelyet általában ennek a hidraulikus energiának a visszanyerésére és a betáplálási áramba történő átvitelére használnak. Ez a rendszer segít csökkenteni a HPP-k energiaszükségletét és méretét²⁰.

A sómentesítési eljárások nagy mennyiségű energiát igényelnek, amit általában fosszilis tüzelőanyagok biztosítanak. A megújuló energiaforrások felhasználása a sómentesítési technológiák működtetésére jó alternatíva a sómentesítés éghajlati hatásainak csökkentésére, valamint édesvíz előállítására a távoli, súlyos vízhiányos, a közcélú elektromos hálózathoz való kedvezőtlen vagy kivitelezhetetlen csatlakozási területeken. A leggyakrabban telepített nap-, geotermikus és szél- vagy hibrid szoláris/szél-sómentesítő berendezések kis kapacitásúak. A megújuló energiák közül a napenergia a legnépszerűbb és legszélesebb körben alkalmazott a világon. Ennek az az oka, hogy a napenergia ingyenes természetes hőforrása,

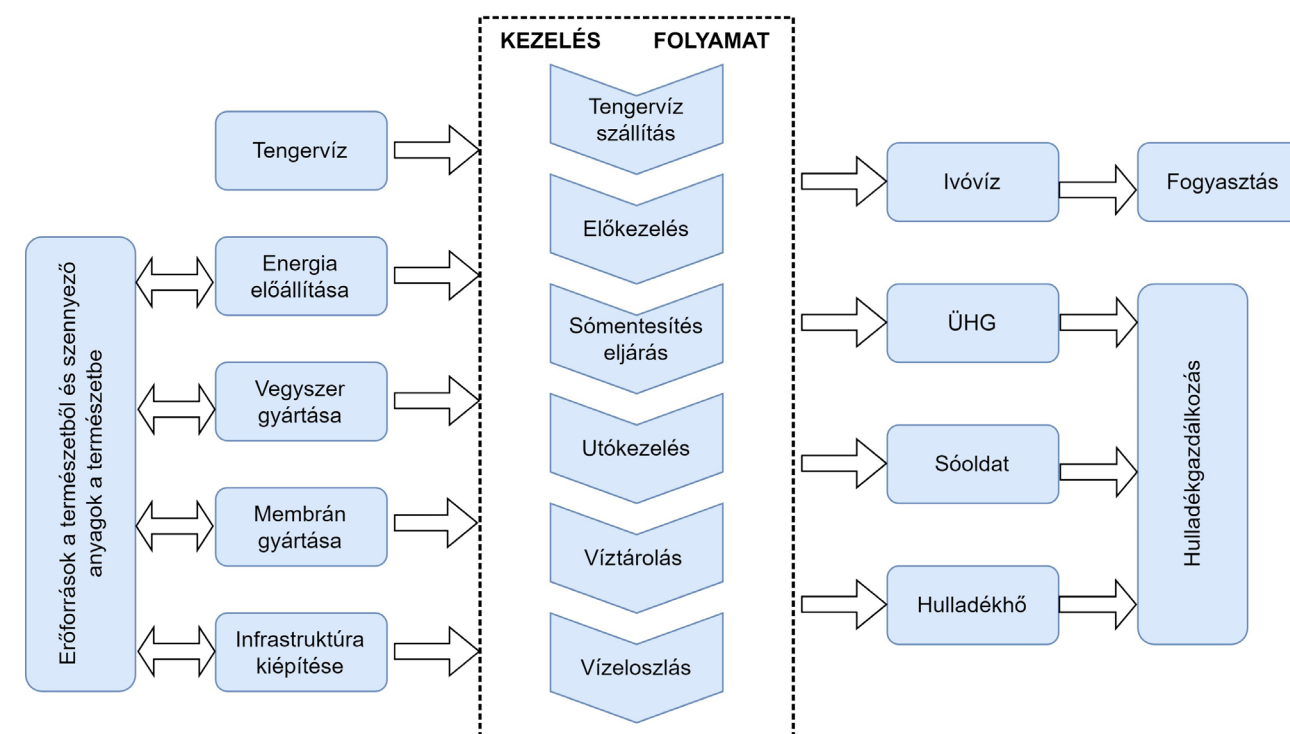
amely közvetlenül sómentesítési eljárások esetében felhasználható. A száraz területek gyakran sok lehetőséget rejtenek a napenergia felhasználására. A viszonylag alacsony üzemeltetési és fenntartási költségek ellenére a megújuló energiarendszerek tökeigénye magas; ebből következően a megtermelt víz költsége magas. A megújuló energiatechnológiák rohamos fejlődésével azonban várhatóan csökkenni fognak a költségek, aminek hatására a víztermelés költsége is csökkenni fog.

2. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

2.1 ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS

Az életciklus-elemzés egy termék, folyamat vagy szolgáltatás teljes életútja során vizsgálja annak környezetre gyakorolt potenciális hatásait. A jelen

tanulmányban végzett életciklus-elemzés célja a három leggyakrabban alkalmazott sómentesítési eljárás (MSF, MED, RO) összehasonlítása a környezeti hatások szempontjából. Továbbá az is vizsgáljuk, hogy a különböző megújuló energiaforrások használata hogyan befolyásolja az eredményeket. A tanulmány csak az üzem működési szakaszát veszi figyelembe, amely magában foglalja a szükséges energia és vegyi anyagszükségletet. Az elemzéshez Szaúd-Arábiából származó adatokat használtunk, a víztermék alapegysége 1 m³ volt. Az egyes sómentesítő üzemek rendszerhatárait a 4. ábra mutatja be. A bemeneti és kimeneti adatokat egy meglévő tanulmányból gyűjtöttük össze és a 2. táblázatban soroltuk fel, amelyben minden paraméter 1 m³ ivóvíz előállításához tartozik. Az adatok a németországi Szövetségi Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Nukleáris Biztonsági Minisztérium 2007-es jelentésén alapulnak²¹.



4. ábra. A vizsgált sómentesítési folyamat életútjának szakaszai²².

			MSF	MED	RO	M.e
Bemenet	Tengervíz		10	9	3	m³
	Hő energia		290	267.5	-	MJ
	Elektromos energia		4	2	4	kWh
	Fertőtlenítő-szer	Klór	20.5	18.5	3.5	g
	Vízkeoldószer	Foszforsav	-	27	6	g
		Kénsav	20	-	195	g
	Klór eltávolítása	Nátrium-biszulfit	-	18	9	g
	Habzágátló	Propilénglikol	1	0.9	-	g
	Koaguláló-szer	Alumínium-klorid	-	-	6.75	g
		Vas-klorid	-	-	53.7	g
	Flokkulálószer	Poliakrilamid	-	-	6.3	g
	Ásványi anyagpótlás	Kalcium-hidroxid	0.5	0.5	0.5	g
Kimenet	Klór		0.7	0.7	0.7	g
	Foszforsav		-	10	-	g
	Kénsav		8	-	6	g
	Réz (a szerkezetianyagok korróziójából)		0.03	20	-	mg
	Propilénglikol		0.09	0.09	-	g
	Nátrium-klorid		45	45	45	kg
	Hulladékhő		73.44	114.24	-	MJ

2. táblázat Egy tipikus sómentesítő üzem leltári adata 1 m³ ivóvíz előállítására²¹.

Az életciklus-elemzés során a SimaProszoftver 9.1-es verzióját használtuk. Ebben a tanulmányban a következő hatáselemzési és értékelési módszereket alkalmaztuk: IMPACT 2002+ V2.14 és IPCC 2013 GWP 100a V1.03.

Az IMPACT 2002+ módszertan egyesíti a középponti és a kár (vagy végpont) megközelítést, az életciklus-leltár minden típusú eredményét 14 középponti kategórián keresztül kapcsolja össze négy kárkategóriával. Ezeket a középponti kategóriákat egy vagy több kárkategóriához rendeli, és a minőségi környezetben bekövetkezett változásokat képviseli. Azonban vannak bizonyos korlátai, számos hatáskategóriát nem vett teljes mértékben figyelembe, például a tengeri környezetre gyakorolt hatásokat, a zajt, az ökotoxicitást és a fémek emberre gyakorolt toxicitását stb.

Az IPCC 2013-as GWP 100a módszere egy olyan környezeti értékelési módszer, amely az üvegházhatású gázok kibocsátását kilogramm CO₂-egyenértékben fejezi ki 100 éves időtávlatban. A módszer elég egyszerű, mivel csak egy hatáskategóriát vesz figyelembe, így nincs lehetőség normalizálásra vagy súlyozásra. A különböző gázkibocsátásokat globális felmelegedési potenciáljuk (Global Warming Potential-GWP) szerint jellemzik, és a különböző kibocsátások klímaváltozási hatáskategóriák szerinti aggregálása az egyik leggyakrabban használt módszer az életciklus-elemzés hatásvizsgálatában. Az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásának jellemzési értékei az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi munkacsoport (Panel on Climate Change-IPCC) által közzétett globális felmelegedési potenciálokra alapulnak. A GWP arányos a szén-dioxid hatásával. A GWP a globális felmelegedéshez való relatív hozzájárulás becslésére szolgáló mutató, amely egy adott

üvegházhatású gáz kilogrammonkénti légköri kibocsátásának hatását méri egy kilogramm szén-dioxid-kibocsátás hatásához képest²³.

2.2 TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSELEMZÉS

A többkritériumos döntéselemzés (Multi-Criteria Decision Analysis-MCDA) egy olyan segédeszköz a tanulmányban vizsgált döntéshozatali folyamathoz, amely viszonylag könnyen képes több (egymásnak ellentmondó) kritériumot értékelni. A TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution) egyszerű, érthető, képes az egyes alternatívák relatív teljesítményének mérésére a legjobbtól a legrosszabbig. A TOPSIS alapkoncepciója az ideális megoldáshoz legközelebbi szabvány szerinti alternatíva kiválasztása²⁴. A klasszikus TOPSIS-módszer a döntéshozóktól származó numerikus adatokra támaszkodik, amelyek segítenek a problémák felépítésében, az elemzés elvégzésében, az alternatívák összehasonlításában és rangsorolásában. Ebben a cikkben a sómentesítési technológiák MCDA-ja klasszikus TOPSIS-módszerrel lett elemzve. A politikai, gazdasági, társadalmi, technológiai, jogi és környezeti tényezők (PESTLE) elemzésén alapuló bemeneti értékeknek a számszerűsítése is elvégeztük a vizsgálatok során.

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

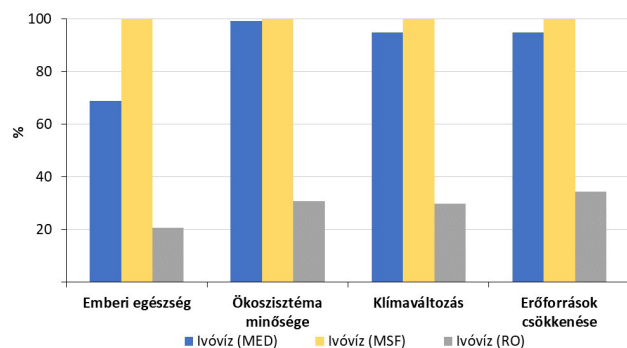
3.1 ÉLETCIKLUS-ELEMZÉS

3.1.1 HAGYOMÁNYOS ENERGIAFORRÁS

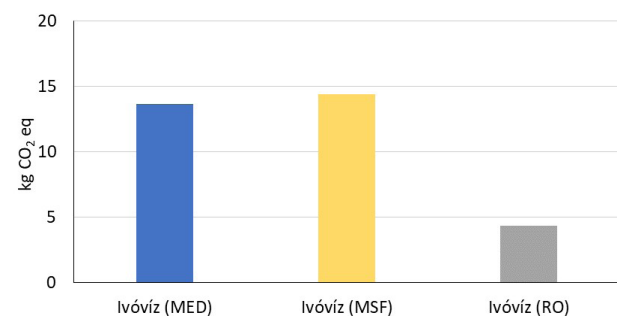
Az 5. ábrán látható a három technológia alapeletének az összehasonlítása az IMACT 2002+ módszer négy kárkategóriája (emberi egészség,

3.1.2 MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁS

ökoszisztéma minősége, klímaváltozás, erőforrások csökkenése) alapján. Az látható, hogy mind a négy kárkategóriát tekintve az RO a legkevésbé környezetkárosító, a termikus technológiák jóval nagyobb mértékben károsítják a környezetet. A 6. ábrán látható a három technológia alapesetének az összehasonlítása az IPCC 2013 módszer alapján, ahol a hatások nyomon követésének idejét 100 évnek választottuk meg. Az eredményeket tekintve az IMPACT 2002+ klímaváltozásra vonatkozó eredményeivel szinte azonos értékeket ad. Jelen esetben is a fő forrás a folyamatok energiaigénye és az értékek azzal arányos növekedése figyelhető meg. Megfigyelhető, hogy az MSF bocsátja ki a legtöbb CO₂-t, 3,3-szor magasabb, ezt követi az MED, ami 3,1-szer magasabb, mint az RO.

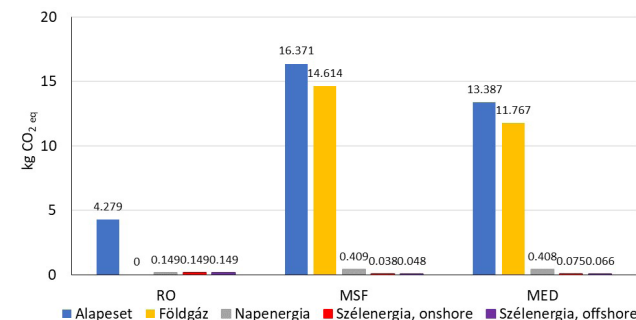


5. ábra. A különböző sómentesítési eljárások összehasonlítása IMPACT 2002+ módszer alapján.



6. ábra. A különböző sómentesítési eljárásoknak összehasonlítása az IPCC 2013 GWP 100a módszer alapján.

Ezt követően a technológiákat egyenként hasonlítottuk össze oly módon, hogy a hagyományos energiaforrásokról megújulóakra váltottuk. Alapesetben a termikus technológiákhoz a hőenergiát egy olaj alapon működő hőerőmű biztosította, az elektromos energiát pedig mindhárom esetben a szaúd-arábiai elektromos áram keverék fedezte a kiindulási pontokban. A megújuló energiaforrások viszonya 7. ábrán látható. Általánosságban is elmondható, hogy minden módszer és kárkategória tekintetében óriási fejlődés tapasztalható. A szélenergia valamivel jobb eredményeket hozott, mint a napenergia. A szélenergián belül a szárazföldi és tengeri erőművek között egyik esetben sincs jelentős különbség. Tehát az üzemeltetési fázist tekintve és egyéb körülményektől eltekintve a szélenergia mondható a legkörnyezetbarátabbnak. A szélenergia és az MSF-technológia kombinációja hozza a legjobb javulást, a környezetbe kerülő CO₂-kibocsátás 99,7%-át képes csökkenteni, az alapesetben mért 16,371 kg CO₂-egyenértékről 0,038 kg CO₂-egyenértékre, ha a szárazföldi szélenergiával helyettesítjük. Ezt követi a MED-technológia, amely 99,5%-kal csökkenti a CO₂-kibocsátást a környezetbe, végül pedig az RO, amely csak 96,5%-os csökkenést eredményez. A termikus sómentesítés sokkal nagyobb mennyiségű energiát igényel, mint a membrántechnológia, így ha ezt az energiát megújuló energiával helyettesítjük, a környezeti, ökológiai rendszerekre, erőforrásokra gyakorolt hatás még nagyobb lesz.

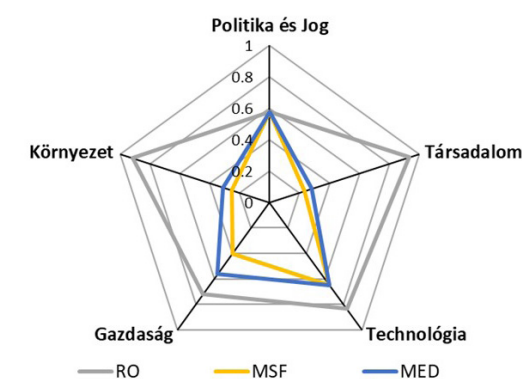


7. ábra. A különböző energiaforrású sómentesítési eljárások széndioxid kibocsátása IPCC 2013 módszer alapján.

3.2 TÖBBKRITÉRIUM DÖNTÉSELEMZÉS

A vizsgált PESTLE-tényezőket (Politikai, Gazdasági, Társadalmi, Technológiai, Jogi, Környezeti) az MCDA számszerű bemeneteként használtuk, amelyben a társadalmi és környezeti tényezők az IMPACT 2002+ módszer alapján végzett hatásvizsgálat eredményei. A politikai és jogi, technológiai, illetve gazdasági tényezőket a TOPSIS-pontszámuk alapján értékeltük, ahol a magasabb érték jobbnak számít (3. táblázat). A politikai és jogi felülvizsgálat azt mutatja, hogy a sómentesítési technológia fejlődését illetően nem tapasztalható szignifikáns különbség a Nyugat-Európai régió országai között. A gazdasági tényező értékelése a közzétett termékegységköltségeken alapul: az RO technológiával előállított 1 m³ tiszta víz ára a legolcsóbb

(0,52-0,56 USD/m³), majd a MED (0,52-1,01 USD/m³), végül az MSF(0,52-1,75 USD/m³) következik²⁵. Az RO magasabb pontszámot kapott a technológiai tényezőben, mint a másik két technológia, mert még manapság is komoly fejlesztési potenciál tapasztalható ezen a membrános eljárási területen. A 8. Ábra a PESTLE faktorok TOPSIS-pontszámmal történő MCDA-eredményeit mutatja.



8. ábra. A PESTLE faktorok MCDA eredményei TOPSIS Pontszámmal: minél magasabb, annál jobb.alapján.

A kritériumok súlyozását az4. táblázatban mutatjuk be. A tényezők súlya szubjektív input, tehát erősen függ a döntéshozó személyes véleményétől. Ebben a tanulmányban a környezeti tényezőt tekintettük a legnagyobb súllyal vezető tényezőnek, amelyet a társadalmi és gazdasági tényezők követtek. Végül a technológiai, politikai és jogi tényezők következtek.

PESTLE Tényező	RO	MSF	MED
Politikai és Jogi	7	7	7
Technológiai	9	7	7
Gazdasági	9	5	7

3. táblázat. A minőségi kritérium alternatív értékelései a klasszikus TOPSIS-módszer esetén. 1- Szegény; 3- Közepesen gyenge; 5- Megfelelő; 7- Közepesen jó; 9- Jó; 2,4,6,8- Köztes értékek között.

	Politika és Jog	Szociális	Technológia	Gazdaság	Környezet
Skálája	VVL-VL	MH	VVL-VL	L	H
Súly	0,0625	0,325	0,0625	0,175	0,375
Gazdagsági	9	5	7		

4. táblázat. Kritériumsúlyok skálája a TOPSIS-módszerben. 0,005- Nagyon-nagyon alacsony (VVL); 0,125- Nagyon alacsony (VL); 0,175- Alacsony (L); 0,225- Közepes alacsony (ML); 0,275- Közepes (M); 0,325- Közepes magasság (MH); 0,375 - Magasság (H); 0,425- Nagyon magas (VH); 0,475- Nagyon-nagyon magas (VVH).

Az MCDA-elemzés összefoglalásaként elmondható, hogy a legjobb alternatívának az RO bizonyult, 1,00 TOPSIS-pontszámmal. A következő a MED, 0,11-es pontszámmal. Az értékelés alapján a legrosszabb alternatíva az MSF-alapú technológia. Az MSF TOPSIS-pontszáma nulla, mivel minden tényezősúlyt negatív ideális megoldásként értékelhetjük.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elemzésünkben három sómentesítési technológia (RO, MSF, MED) alapesetét hasonlítottuk össze, ahol kezdetben fosszilis tüzelőanyagok biztosították a folyamatok energiaszükségletét. Összességében a különböző hatáselemzési eljárások hatáskategóriáinak eredményei hasonló tendenciát mutattak. Megállapítottuk, hogy az alapvetően fosszilis energiát használó RO volt a legkörnyezetbarátabb, a legalacsonyabb hatással volt az ökoszisztémára, a természetes erőforrásokra és az emberi egészségre. Fontos megjegyezni, hogy az elemzés csak a működési szakaszt vizsgálta. A membrános eljárások esetében még rengeteg innovációs lehetőség rejlik, és ezen a területen folyamatos fejlődés tapasztalható napjainkban is. A technológia

kiválasztásánál figyelembe kell venni, hogy a membránok működtetése során előfordulhatnak eltömődések, illetve az RO-membránok élettartama jelenleg 5-7 év.

Megállapítottuk, hogy a fosszilis energiaforrásról bármely más, megújuló energiaforrásra való átállás legalább egy nagyságrenddel csökkentette a kárkategóriák értékét. A nap- és a szélenergia között azonban nem találtunk jelentős különbséget. Nagy előnyük, hogy a beruházást követően üzemeltetésük nem jár károsanyag-kibocsátással, viszont maga a beruházás költsége magas. A legnagyobb hátrány, hogy ezeknek az energiaforrásoknak a rendelkezésre állása korántsem állandó, hanem szezonális, és mivel az energiatárolás problémája jelenleg nem megoldott, nem támaszkodhatunk kizárólag a megújulókra. Azt is figyelembe kell venni, hogy ezeknek az erőműveknek az élettartama jóval rövidebb, mint a hagyományos erőműveké. Ez pedig a gazdasági hatékonyságukat is megkérdőjelezi.

A legnagyobb potenciál az RO-ban, illetve a kombinált energiaforrásokban rejlik. A membrános technológia a jövőben várhatóan továbbra is fejlődni fog. Hosszabb élettartamú, olcsóbb

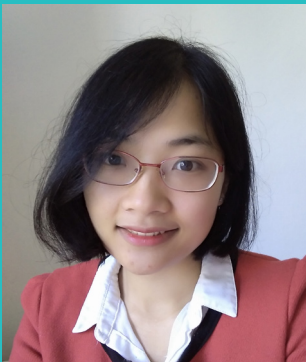
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

membránok előállítására várható, továbbá az eljárásenergiaigénye is csökkenhet a modern energia-visszanyerő rendszereknek köszönhetően. Jelen tanulmány bővebb kifejtése megtalálható a Water folyóiratban megjelent publikációkban. (Do Thi et al., Water 2021, 13(21), 3023, doi: 10.3390/w13213023)

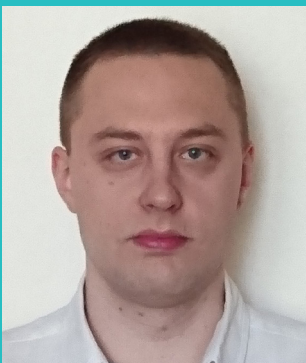
A publikáció az OTKA 128543, az OTKA 131586, a MEC 140699 és az NTP-NFTÖ-21-B-0014 pályázatok támogatásával készült.

▶ IRODALOMJEGYZÉK

SZERZŐ:



Do Thi Huyen Trang: vietnámi hallgató, 2017-ben szerezte a BSc. diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a környezetmérnöki szakon, míg ugyanitt 2020. júniusában az MSc fokozatot. 2020. szeptembertől a Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszéken PhD hallgató. Kutatási területei: szennyvíztisztítás, membránműveletek, életciklus-elemzés.



Dr. Tóth András József: 2015-ben szerezte a PhD fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Azóta a Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszéken dolgozik a Környezeti és Folyamatmérnöki Kutatócsoportban (). Kutatási területei: szennyvíztisztítás, hulladékgazdálkodás, membránműveletek, illetve desztillációs módszerek fejlesztése.