

A karbonsemlegesség kihívásai és lehetőségei: szakirodalmi elemzés és nemzetközi megközelítések

Fazekas Bianka

egyetemi hallgató, Óbudai Egyetem Keleti Károly Gazdasági Kar

Fazekas.Bianka@stud.uni-obuda.hu

Szikora Péter

egyetemi docens, Óbudai Egyetem Keleti Károly Gazdasági Kar

szikora.peter@kgk.uni-obuda.hu

Absztrakt: A karbonsemlegesség elérése alapvető jelentőségű az éghajlatváltozás hatásainak mérséklésében és a fenntartható fejlődés biztosításában. A dolgozatban bemutatjuk a szén-dioxid-semlegesítés technológiai, gazdasági és társadalmi vonatkozásait, különös tekintettel a mikroalgák szén-dioxid-megkötő és szennyvíztisztító képességeire, valamint a nemzetközi karbonsemlegességi stratégiákra. Kiemeljük a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére irányuló egyéni, közösségi és kormányzati szintű lépések szükségességét, amelyek támogatják a megújuló energiák, innovatív technológiák és fenntartható gazdasági modellek alkalmazását. A dolgozatban bemutatjuk a mikroalga-alapú technológiák előnyeit, beleértve a szén-dioxid-megkötési hatékonyságot és a szennyezőanyagok eltávolítását, miközben feltárjuk a széleskörű alkalmazásuk előtt álló kihívásokat. A szakirodalmi összegzésünk rávilágít a karbonsemlegesség globális eléréséhez szükséges multidiszciplináris megközelítés jelentőségére.

Kulcsszavak: karbonsemlegesség, fenntarthatóság, környezettudatosság, klímaváltozás

1. Karbonsemlegesség

A karbonsemlegesség koncepciója 1995-ben jelent meg, amikor a biomassza-alapú energia karbonsemlegességét vizsgálták. Azóta globális fontosságúvá vált, különösen a 2008-as brit éghajlatváltozási törvény és a 2015-ös Párizsi Megállapodás hatására, amely 2050-re nettó nulla kibocsátást irányoz elő. Az IPCC 2018-as jelentése rögzítette a fogalmat, és egyre több ország vállal kötelezettséget. A kibocsátási csúcsok elérése kiemelt jelentőségű, például Kína 2030-as célkitűzése. Az emisszió fő forrásai az energia, az ipar és a közlekedés, így a kutatások ezekre, valamint zöld technológiákra és modernizációra összpontosítanak. A fenntartható átalakulás és megújuló energiák alkalmazása elengedhetetlen az éghajlati célok időben történő eléréséhez.

A karbonsemlegesség kutatása a technológiák fejlesztésére, társadalmi-gazdasági hatásaikra és támogató intézkedések hatékonyságára fókuszál. A megoldások 12 kategóriába sorolhatók, például CCUS (szén-dioxid-leválasztás és -tárolás), biomassza-alapú energia, NET-ek (negatív kibocsátású technológiák) és BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage). A NET-ek a szén-dioxid-eltávolítás révén kiemelt szerepet kapnak a 1,5 °C-os cél elérésében, de fejlesztésük jelentős erőforrásigényű, környezeti kockázatokkal, például biodiverzitás-csökkenéssel. Földrajzi és életciklus-elemzésekkel vizsgálják hatásaikat, míg irányítási kutatások a költséghatékonyságot elemzik. A technológiai innováció és a meglévő energiarendszerek integrálása kulcsfontosságú, különösen Kínában, ahol az energiarendszerek merevsége kihívást jelent. A karbonsemleges technológiák alkalmazása az éghajlatkezelés és a globális verseny szempontjából stratégiai jelentőségű. (Chen, L. 2022), (Wei, 2022).

A karbonsemlegességhez elengedhetetlen a fosszilis tüzelőanyagok megújuló energiákkal való helyettesítése, az ipari szén-dioxid-leválasztás fejlesztése, valamint az energiatakarékos életmód ösztönzése. A nap-, szél- és biomassza-alapú energia költségeinek csökkenése segíti ezek széleskörű alkalmazását, míg a földi szénnyelők, például az erdőgazdálkodás, alacsony költségű szén-dioxid-eltávolítást biztosítanak korlátozott kapacitással. A szén-dioxid-árak szabályozása ösztönözheti a technológiai innovációt, miközben az ökológiai helyreállítás támogatja a fenntartható fejlődést. A karbonsemlegesség nemcsak a klímavédelemhez járul hozzá, hanem javítja a levegőminőséget és elősegíti az energiabiztonságot, alapot teremtve egy új ipari forradalomhoz (Chen, 2021).

Kína, mint a legnagyobb szén-dioxid-kibocsátó, kulcsfontosságú szerepet játszik az éghajlatvédelemben. 2020-ra 48,4%-kal csökkentette szén-dioxid-intenzitását 2005-höz képest, teljesítve célkitűzéseit. A 2030-as kibocsátási csúcs és a 2060-as karbonsemlegesség eléréséhez Kína a fosszilis energia arányának csökkentésére, a megújulók bővítésére, valamint zöld piac kialakítására törekszik. Az ötéves tervek és a szigorodó politikák támogatják e célokat, míg Xi Jinping 2020-ban megerősítette az elköteleződést, előirányozva a szén-dioxid-intenzitás további 65%-os csökkentését 2030-ra. Kína példát mutat a fenntartható fejlődés és technológiai reformok terén (Liu, Z, 2022).

A szén-dioxid-kibocsátás statisztikai elemzése nélkülözhetetlen a kibocsátás csökkentésére irányuló stratégiák kidolgozásában és hatékonyságuk értékelésében. Egy kínai ipari ágazatokat vizsgáló kutatás szerint a szén-dioxid-kibocsátás döntő hányada három fő szektorhoz köthető:

- Elektromos és hőenergia termelés és szállítás,
- Kőolaj-feldolgozás és kokszyártás,
- Fémek bányászata és feldolgozása.

E három iparág összesen a teljes kibocsátás közel 80%-át adja. Ez jól mutatja, hogy a nehézipar és az energiatermelés Kína szén-dioxid-kibocsátásának fő mozgatórugói. Az építőipar szintén jelentős szereplő, különösen a gyors urbanizáció miatt. Az infrastruktúra-fejlesztésekhez kapcsolódó beton- és acéltermelés energiaigényes, ami növeli a szén-dioxid-kibocsátást (Wu, X., 2022).

Az EU célja, hogy 2050-re szén-dioxid-semlegessé váljon, amelyhez nettó nulla kibocsátású technológiák szükségesek. Németország, Franciaország és Hollandia jelentős beruházásokat hajtott végre, de a technológiai innovációk hatékonysága eltérő: Németország 37%-kal, Franciaország 50%-kal, Hollandia pedig 25%-kal csökkentette egy főre jutó kibocsátását az elmúlt 50 évben. Az EU 2019-es European Green Deal kezdeményezése 2030-ra 40%-os, 2040-re 60%-os, 2050-re pedig 80%-os kibocsátáscsökkentést irányoz elő. Az átállás komoly kihívásokkal jár, például jelentős tőkebefektetések és technológiai áttörések szükségesek. Az EU és Kína együttműködése kulcsszerepet játszhat a globális karbonsemlegességi célok elérésében. (Pata, 2024).

Az Egyesült Királyság vezető szerepet tölt be a karbonsemlegességi politikákban. 2015-ben csatlakozott a Párizsi Megállapodáshoz, vállalva a hőmérséklet-emelkedés 1,5°C alatti korlátozását, majd 2019-ben törvényben rögzítette a 2050-es szén-dioxid-semlegességi célt. A Brit Szabványügyi Intézet PAS 2060 szabványa globális mérföldkő a fenntarthatóság terén. A karbonsemlegességi célok az ipar, közlekedés és energia szektorokat érintik, beleértve a légitözlekedést, amely 2050-re karbonsemlegességet ígért. A zöld ipari forradalom tízpontos terve, bemutatva 2020-ban, 80%-os kibocsátáscsökkentést céloz 2050-re. Az Egyesült Királyság ezzel példát mutat az éghajlatpolitikai fellépésben. (Wu, X., 2022).

Joe Biden elnöksége új lendületet adott az amerikai éghajlatpolitikának. Az Egyesült Államok visszatért a Párizsi Megállapodáshoz, és ambiciózus célokat tűzött ki: 2035-re szén-dioxid-mentes villamosenergia-termelést, 2050-re pedig karbonsemleges gazdaságot kíván elérni tiszta energiaforrásokra alapozva. Biden politikája támogatja a megújuló energiaforrásokat, az energiahatékonyságot és az innovatív technológiák fejlesztését. Az éghajlatváltozásról szóló belső megosztottság azonban kihívást jelenthet a célok elérésében. Aktív szerepvállalásával az Egyesült Államok ismét vezető szerepet vállalhat a globális éghajlatváltozás elleni küzdelemben. (Wu, X., 2022)(Mizik, 2021).

A globális környezetszennyezés és felmelegedés, főként a fosszilis tüzelőanyagok túlzott használata miatt, 2020-ra rekord szén-dioxid-kibocsátást eredményezett, növelve a társadalmi tudatosságot és az éghajlatvédelmi megállapodások, például a Párizsi Megállapodás elfogadását. A karbonsemlegességi elérése érdekében 2021-re 124 ország tett kötelezettségvállalást, különböző stratégiákat alkalmazva: Skandinávia Pigouvian adókat, Kína fenntartható gazdasági irányelveket, Ausztrália pedig oktatási programokat vezetett be. Számos fejlett ország, köztük az EU tagállamai, jogszabályokkal erősítette meg

céljait, míg fejlődő országok, mint Nigéria és Vietnam, konkrét terveket dolgoztak ki. Ezek az intézkedések kulcsfontosságúak a fenntartható jövő és a globális együttműködés szempontjából. (Chen, J. M., 2021), (Chen, L., 2022) (Zhong, M. 2022).

A karbonsemlegesség elérése kulcsfontosságú gazdasági és környezeti szempontból, mivel az éghajlatváltozás globális kihívása sürgető megoldásokat kíván. A nettó nulla kibocsátás célja az üvegházhatású gázok kibocsátásának teljes kompenzációja, ami hosszú távon támogatja a fenntartható gazdasági fejlődést. A megújuló energiaforrások és energiahatékony technológiák alkalmazása mérsékli az energiaköltségeket, fokozza az innovációt, és új piaci lehetőségeket teremt, például a karbonkredit-kereskedelem révén. Az ökológiai lábnyom csökkentése a vállalati versenyképesség növekedésével is jár, mivel a fogyasztók egyre inkább előnyben részesítik a fenntartható márkákat. A környezetvédelmi szempontok szintén hangsúlyosak: a kibocsátás mérséklése hozzájárul a légszennyezés és az egészségügyi kockázatok csökkentéséhez, valamint az ökoszisztémák és a biológiai sokféleség megőrzéséhez. A fosszilis tüzelőanyagok kiváltása fenntartható energiatermelést és stabil gazdasági alapokat biztosít. A karbonsemlegesség eléréséhez mind a vállalatok, mind az egyének aktív szerepvállalása szükséges: a cégeknek integrálniuk kell a fenntarthatóságot stratégiáikba, míg az egyének környezettudatos döntéseikkel támogathatják a globális célokat. Ez az átalakulás hosszú távú gazdasági és társadalmi stabilitást eredményezhet. (Deák, 2014) (Feng, C., 2021) (Buss, W, 2022) (Zhu, J. 2023) (Hou, C., 2024).

Óceánalapú megoldások

Az óceánok kulcsszerepet játszanak az éghajlatváltozás mérséklésében, hiszen a szén-dioxid körforgásának központi elemei. A globális kibocsátás 25-30%-át és az üvegházhatású gázok által csapdába ejtett hő 93%-át elnyelik, ezzel nélkülözhetetlenek a fenntartható jövő szempontjából. Az OSCRAM modell (Ocean-based Solutions Carbon Reduction Assessment Model) a tengeri ökoszisztémák, a part menti élőhelyek, a tengeri közlekedés és energia, valamint a halászat szén-dioxid-csökkentési lehetőségeit vizsgálja. Ezt a modellt például Kína óceáni kapacitásának értékelésére alkalmazták, kiemelve az alacsony kibocsátású tengeri közlekedés és a megújuló tengeri energia fejlesztésének fontosságát. Az óceánalapú megoldások – például a part menti vizes élőhelyek helyreállítása – jelentős szén-dioxid-tárolási potenciállal rendelkeznek, ugyanakkor az éghajlatváltozás, az óceánok savasodása és a korallzátonyok pusztulása veszélyezteti az óceánok egészségét. Jelenleg a klímapolitikák inkább szárazföldi megoldásokra fókuszálnak, miközben az óceánalapú megközelítések kiaknázatlan lehetőségeket rejtenek. Ezek közé tartozik a tengeri megújuló energia hasznosítása, a fenntartható halászat, valamint a szén-dioxid elnyelésére és tárolására alkalmas óceáni technológiák fejlesztése. Az óceánok éghajlatváltozásban betöltött szerepének tudományos

vizsgálata azonban összetett, és a módszertani különbségek akadályozzák az integrált megközelítések alkalmazását. Az óceáni potenciál feltárása továbbra is fontos kutatási és politikai prioritás (Feng, C., 2021).

Az óceánalapú szén-dioxid-csökkentési értékelő modell (OSCRAM) egy átfogó eszköz, amely az óceánok szerepét vizsgálja a szén-dioxid-kibocsátás mérséklésében. A modell öt fő területet integrál: part menti ökoszisztémák, óceáni energia, tengeri közlekedés, halászat, valamint tengerfenéki geológiai széntárolás. A part menti ökoszisztémák – például mangrove erdők, sós mocsarak és tengeri fű övezetek – jelentős szerepet játszanak a szén-dioxid elnyelésében és tárolásában. Kínában az OSCRAM alkalmazásával végzett elemzések szerint az óceánalapú megoldások évente 6,86 teragram szén-dioxid-kibocsátást képesek csökkenteni. Ez a szám tengeri moszat alkalmazásával akár 9,24 teragramra is növelhető. Az óceáni energia modulon belül a tengeri szélenergia bizonyult a legnagyobb mértékben hozzájáruló tényezőnek, amelyet a tengeri közlekedés hatékonyságjavítása és a part menti „kék szén” alapú kibocsátáscsökkentés követ. Az eredmények rámutatnak az óceáni erőforrások kihasználásának potenciáljára a klímaváltozás elleni küzdelemben (Feng, C., 2021).

Az óceáni szén-dioxid eltávolítás (OCDR) egyre nagyobb figyelmet kap az éghajlatváltozás hatásainak mérséklésében, mivel az óceán kulcsszerepet játszik a globális szén ciklusban. Az óceán, amely a Föld felszínének több mint 70%-át borítja, az antropogén CO₂-kibocsátás körülbelül 25%-át nyeli el, és szénmegkötő kapacitása akár 50-szer nagyobb lehet, mint az iparosodás előtti légköré. Az OCDR technológiák ezen kapacitás fokozásával hatékonyan járulhatnak hozzá a légköri szén-dioxid csökkentéséhez. A jelenlegi nemzeti kötelezettségvállalások alapján a globális felmelegedés várhatóan eléri a 2,7°C-ot 2100-ra, ami jelentősen meghaladja a Párizsi Megállapodás 1,5-2°C-os célját. A felmelegedés korlátozásához elengedhetetlen az üvegházhatású gázok kibocsátásának gyors mérséklése és az örökölt légköri szén-dioxid eltávolítása. Az Egyesült Államok, az Európai Unió és jótékonyági alapok már jelentős forrásokat szenteltek az OCDR kutatására, az Egyesült Államok Nemzeti Tudományos, Mérnöki és Orvosi Akadémiái pedig részletes kutatási ütemtervet dolgoztak ki. Az OCDR előnyei közé tartozik, hogy megakadályozhatja a leválasztott CO₂ visszajutását a légkörbe, valamint egyes módszerei hozzájárulhatnak az óceánok savasodásának csökkentéséhez is. Az óceánalapú megoldások tehát nemcsak a szén-dioxid eltávolításához, hanem az óceáni ökoszisztémák és az emberi közösségek védelméhez is kulcsfontosságúak. (Cooley, 2023)

Az óceán természetes képessége a szén-dioxid megkötésére és tárolására kulcsfontosságú az éghajlatváltozás mérséklésében. A vízben oldódó szén-dioxid szénsavat képez, amely jelentősen növeli az óceán szénmegkötési kapacitását. Az ipari forradalom óta a kibocsátott szén-dioxid körülbelül 26%-át az óceán nyelte el, de ez a folyamat az óceánok elsavasodásához vezetett, amely negatív hatással van a tengeri

ökoszisztémákra. Az OCDR-technológiák célja, hogy geokémiai és biológiai mechanizmusok révén fokozzák az óceán szén-dioxid-elnyelési és -tárolási képességét. A módszerek során a CO₂-t oldott szénsavként, szerves biomasszaként vagy geológiai lerakódások formájában tárolják. Biológiai alapú technikák, mint például a fitoplankton műtrágyázás vagy a makroalgák telepítése, rövid távon, 10–100 évig csökkenthetik a légköri szén-dioxid mennyiségét, amennyiben a biomasszát mély óceáni területekre helyezik vagy eltemetik. Azonban a tárolási időt korlátozza a növényi biomassza lebomlása, amely során a megkötött szén-dioxid egy része visszakerül a vízbe, a bomlási körülmények függvényében. A tárolás tartóssága és hatékonysága nagyban függ az alkalmazott technológiától és a tárolás helyétől. A felszíni óceánban végzett szén-dioxid-tárolás, például a biomassza elhelyezése vagy a CO₂ közvetlen befecskendezése, az óceáni áramlások és keveredés miatt várhatóan 50–100 év alatt elveszti a megkötött szén több mint 70%-át. Az óceán mélyebb rétegeibe történő tárolás hatékonyabb lehet, de ennek megvalósítása technológiai és környezeti kihívásokat rejt (Cooley, 2023).

Az óceáni szén-dioxid-eltávolítás (OCDR) technológiák a légköri CO₂ csökkentésének ígéretes eszközei, ám nagy léptékű alkalmazásuk gazdasági, technikai és logisztikai kihívásokkal jár. A NASEM jelentése szerint a különböző eljárások eltérő eltávolítási potenciállal rendelkeznek. Az ökoszisztéma-helyreállítás alacsony hatékonyságot mutat, míg a mesterséges fel- és leáramlás, valamint a tengeri algák telepítése közepes potenciállal bír. A fitoplankton trágyázás, az óceán lúgosságának növelése és az elektrokémiai módszerek közepes vagy magas eltávolítási kapacitást kínálnak, akár évi 1 gigatonna CO₂-t is elérve. Az alkalmazás gazdasági megvalósíthatósága azonban korlátozott. Az óceán lúgosítása 7,3 Gt CO₂ eltávolítását eredményezheti évente, de költségei meghaladják a 100–150 \$/tonna CO₂-t, ami évi 370–550 milliárd dollárt tesz ki. A makroalgák termesztése kisebb léptékben, 100 \$/tonna CO₂ mellett évente 10 milliárd dollárból 0,1 Gt CO₂ eltávolítását teszi lehetővé egy 73 000 km²-es területen. A technológiai skálázhatóságot akadályozza a logisztikai infrastruktúra, a megújuló üzemanyagok elérhetősége, valamint a szükséges nyersanyagok szállítása. Bár a tengeri hajóflotta bővítése javíthatná az ellátási láncot, a magas költségek és a területi korlátozások továbbra is komoly kihívások elé állítják az OCDR nagyarányú implementációját (Cooley, 2023).

Az éghajlatváltozás kezelésében kulcsfontosságú a kibocsátások csökkentése és a légköri szén-dioxid eltávolítása. A bioszén-technológia olyan CDR-megoldás, amely ötvözi a szénmegkötést a mezőgazdasági terméshozam növelésével és a talajminőség javításával. Éves globális CO₂-eltávolítási potenciálja 0,03–6,6 gigatonna között mozoghat, életciklus-elemzései pedig alátámasztják hatékonyságát. A bioszén ásványi anyagokkal dúsítva lassan felszabaduló műtrágyaként használható, és növelheti a szénmegkötési kapacitást, bár az ásványi adalékanyagok költsége korlátozhatja alkalmazásukat. Nagy léptékű bevezetéshez

költséghatékony ásványi anyagokra és biomasszára van szükség, különösen olyan területeken, ahol ezek elérhetősége kedvező. A biomassza költsége jelenleg jelentős tényező az eltávolítási költségekben, és az árak növekedése, például a BECCS technológiák iránti kereslet miatt, tovább emelheti az alapanyagárakat. Az ásványi anyagokkal való dúsítás hosszú távon csökkentheti a költségeket, különösen, ha növeli a bioszén előállításának hatékonyságát. A költségek alakulását az alapanyagok ára dominálja, míg a bioszén konverziós hatékonysága meghatározza, hogy mennyi alapanyagra van szükség a CO₂-eltávolításhoz. További kutatások szükségesek az ásványi anyagok optimális típusának és mennyiségének meghatározásához, hogy javítsák a technológia gazdaságosságát és hatékonyságát (Buss, W, 2022).

A Zöld gyártás és szén-dioxid-árképzés

A zöld ipari korszerűsítés alapvető a hagyományos iparágak fenntartható átalakításában. Az alacsony szén-dioxid-kibocsátású nyersanyagok és tiszta gyártási folyamatok alkalmazása csökkenti a kibocsátást, miközben lehetőséget teremt a szén-dioxid újrahazsnosítására értékes szénalapú termékek, például üzemanyagok és vegyi anyagok előállításával. Ez nemcsak a fenntarthatóságot támogatja, hanem gazdasági és társadalmi értéket is teremt. Ugyanakkor fontos kérdés, hogy ezek az eljárások valóban karbonsemlegesek-e, figyelembe véve az anyagok és termékek teljes életciklusát. Az életciklus-alapú kibocsátáértékelési szabványok bevezetése segítheti a vállalkozásokat és országokat az egységes mérési rendszer alkalmazásában. Ez alapot nyújt a piaci alapú éghajlatvédelmi intézkedésekhez, például a szén-dioxid-árképzési mechanizmusokhoz. Ezek két fő formában léteznek: szén-dioxid-adók és kibocsátás-kereskedelmi rendszerek. A Világbank adatai szerint 2020-ig 61 ilyen mechanizmust alkalmaztak vagy terveztek bevezetni, amelyek a globális kibocsátás 22%-át érintik. A szén-dioxid-árképzés hatásai regionálisan eltérőek. Míg egyes politikák a kibocsátás csökkentését támogatják, mások társadalmi egyenlőtlenségeket idézhetnek elő, különösen a fejlődő országokban. Egy globális, likvidebb szén-dioxid-kereskedelmi piac létrehozása hatékonyabbá teheti az emissziócsökkentést, de figyelembe kell venni a különböző gazdasági és társadalmi körülményeket. A zöld korszerűsítés, a szén-dioxid-hasznosítás és az egységes szabványok bevezetése kulcsfontosságú a fenntartható fejlődéshez. Ugyanakkor a regionális különbségek kezelése elengedhetetlen a társadalmi igazságosság és a globális átállás sikerének biztosításához (Zhu, J. 2023).

A karbonsemlegesség eléréséhez a demonstrációs projektek kulcsszerepet játszanak, mivel integrálják a technológiai, ipari, politikai és társadalmi elemeket, miközben gyakorlati példákat nyújtanak a zéró kibocsátású rendszerek működésére. Ezek a projektek globálisan alkalmazható megoldásokat kínálnak különböző léptékű kezdeményezéseken keresztül, mint például zöld városok, fenntartható kampuszok és

megújuló energiával működő épületek. A demonstrációk nemcsak a technológiai megvalósíthatóságot igazolják, hanem gazdasági, társadalmi és politikai együttműködési lehetőségeket is feltárnak. Világszerte számos példa igazolja a demonstrációk sikerét: a 2022-es pekingi téli olimpia teljes mértékben megújuló energiát használt, Németország karbonsemleges egyetemi modelljeit fejleszti, és olyan fenntartható városok, mint Helsinki, Masdar vagy San José, innovatív megoldásokat alkalmaznak. Az Apple új központja és más vállalati projektek is mintaként szolgálnak. Ezek a kezdeményezések nemcsak helyi szinten, hanem globális modellként is funkcionálnak. A demonstrációk sikeres megvalósításához három kulcsfontosságú tényező szükséges: hatékony energiagazdálkodás, a karbonsemleges technológiák népszerűsítése és piaci elterjesztése, valamint politikai támogatás ösztönzőkkel és kedvezményes szabályozásokkal. Ezek az elemek biztosítják, hogy a demonstrációk más régiókban is alkalmazhatóvá váljanak. Összességében a demonstrációk nemcsak a karbonsemlegességi technológiák bemutatására szolgálnak, hanem irányítják a hosszú távú, integrált megközelítéseket. Ezek hozzájárulnak a globális fenntarthatósági célok eléréséhez, miközben társadalmi, gazdasági és politikai dimenziókat is kezelnek a sikeres átállás érdekében. (Pata, 2024)

A mikroalgák ígéretes megoldást nyújtanak a szén-dioxid-semlegesítés és a szennyező anyagok eltávolítása terén, köszönhetően kivételes tulajdonságaiknak. Ezek az autotróf organizmusok kiemelkednek gyors növekedésükkel, magas lipidtartalmukkal, kiváló fotoszintetikus hatékonyságukkal, valamint azzal a képességükkel, hogy nem igényelnek termőföldet. Hatékonyságuk messze felülmúlja a szárazföldi növényekét, mivel 10-50-szer nagyobb hatékonysággal kötik meg a szén-dioxidot. A mikroalgák bioüzemanyaggá történő átalakítása során előállított termékek, mint a biodízel és a bioszén, szén-dioxid-semleges energiaforrásokat biztosítanak. Ez különösen jelentős az energiaigények növekedése és a fenntartható energiaforrások iránti kereslet fokozódása szempontjából. Továbbá a mikroalgák képesek a füstgázokból származó szén-dioxid hatékony megkötésére és a szennyvíz tápanyagainak hasznosítására. A biomasszából származó bioszén nemcsak energiaforrásként használható, hanem hozzájárul a talaj javításához és a szén-dioxid tárolásához is, amely tovább növeli az eljárás környezeti előnyeit. Az ipari méretű mikroalga-termesztés jelenleg jelentős akadályokkal néz szembe. A termesztéshez nagy mennyiségű vízre és műtrágyára van szükség, amelyek előállítása jelentős energiafogyasztással és üvegházhatású gázkibocsátással jár. A műtrágyák gyártása például a termesztési energiafogyasztás akár 50%-át is kiteheti. Ezen túlmenően a betakarítási módszerek, mint a centrifugálás, szűrés és flotálás, rendkívül energiaigényesek, ami megemeli a biomassza előállításának költségeit. A költségek csökkentése és a fenntarthatóság növelése érdekében a mikroalgákat szennyvízben történő termesztés során is alkalmazzák. Ebben az esetben a szennyvíz biztosítja a szükséges tápanyagokat, mint a nitrogén és foszfor,

miközben a mikroalgák eltávolítják a szennyező anyagokat. Ez a megközelítés nemcsak a költségeket csökkenti, hanem hozzájárul a szennyvízkezelés hatékonyságához is.

Továbbá a szén-dioxid-kereskedelem és a szén-dioxid-adó mechanizmusai jelentős gazdasági ösztönzőként szolgálhatnak, növelve a mikroalga-alapú bioüzemanyagok versenyképességét. Az utóbbi években számos kutatás irányult a mikroalgák szén-dioxid-semlegesítési és szennyezőanyag-helyreállítási képességeinek optimalizálására. A hangsúly a természetési és feldolgozási folyamatok energiahatékonyságának növelésén, valamint a technológiák gazdasági életképességének javításán van. Összességében a mikroalgák kiemelkedő potenciállal rendelkeznek az energiaválság és a környezetszennyezés problémáinak enyhítésében. Bár az ipari méretű alkalmazás gazdasági akadályokkal szembesül, az innovatív megoldások és a technológiai fejlesztések kulcsfontosságúak lehetnek a fenntartható fejlődéshez vezető úton (Hou, C., 2024).

A mikroalgák kiemelkedő képességgel rendelkeznek a fotoszintézis révén történő szén-dioxid-megkötés terén, hatékonyságuk 10–50-szerese a szárazföldi növényekének. Egy tonna mikroalga biomassza előállításakor körülbelül 1,88 tonna szén-dioxidot vonnak ki a légkörből. A mikroalgák nemcsak a szén-dioxid semlegesítésében, hanem a szennyvíztisztításban is hatékonyak, mivel képesek hasznosítani a szennyvízben található nitrogén- és foszforforrásokat. Például a *Chlorella* alga bizonyítottan képes eltávolítani az ammóniát, valamint jelentős mértékben csökkenti a foszfor- és nitrogéntartalmat, miközben nagy biomasszát állít elő. A mikroalgák alkalmazása szennyvíz és füstgázok kezelésére ígéretes technológiai megoldást kínál, azonban a nehézfémek toxikus hatásai, például a fotoszintézis gátlása, akadályozhatják növekedésüket. Az életciklus-értékelések és gazdasági elemzések rávilágítottak arra, hogy a mikroalgák integrálása a bioüzemanyag-gyártásba nemcsak gazdaságilag, hanem környezetvédelmi szempontból is előnyös. Az energiaválság és környezetvédelmi kihívások miatt a mikroalga-alapú technológiák iránt egyre nagyobb az érdeklődés, bár széles körű alkalmazásukat még technológiai kihívások hátráltatják. (Hou, C., 2024)

Összefoglalás

Az éghajlatváltozás és a globális felmelegedés jelentős kihívást jelent az emberiség számára, amelyet a fosszilis tüzelőanyagok túlzott használata és a szén-dioxid-kibocsátás növekedése tovább súlyosbít. A karbonsemlegesség elérése elengedhetetlen a fenntartható jövő biztosításához. A globális célkitűzések, mint a Párizsi Megállapodás, az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentését és a globális hőmérséklet-emelkedés 1,5 °C alatt tartását célozzák. Számos ország vállalta, hogy 2050-re vagy 2060-ra eléri a karbonsemlegességet, különféle stratégiák alkalmazásával, beleértve a jogszabályok bevezetését,

zöld technológiák támogatását és fenntartható gazdasági rendszerek kialakítását. A mikroalgák kiemelkedő szerepet játszhatnak a szén-dioxid-semlegesítési stratégiákban, mivel szén-dioxid-megkötési képességük 10–50-szerese a szárazföldi növényekének. Biomassájuk előállítása során tonnánként 1,88 tonna szén-dioxidot képesek megkötni, miközben hozzájárulnak a szennyvíz és a füstgázok kezeléséhez is. A mikroalgák a szennyvízben található szerves anyagokat és tápanyagokat hasznosítják, jelentősen csökkentve a káros összetevőket, például az ammóniát, a nitrogént és a foszfort. Ezenkívül gazdasági és környezeti szempontból is előnyösek, mivel hozzájárulhatnak a bioüzemanyag-ipar fenntarthatóságához. A karbonsemlegesség gazdasági haszna jelentős: a zöld technológiákba való beruházás ösztönzi az innovációt, csökkenti az energiaköltségeket és új munkahelyeket teremt. A fogyasztók növekvő kereslete a környezettudatos vállalatok iránt további piaci előnyt jelent. Ugyanakkor a technológiai akadályok, például a nehézfémek toxikus hatásai és az ipari alkalmazás költségei, kihívást jelentenek a mikroalga-technológiák széles körű bevezetése szempontjából. Az együttműködés és az innováció kulcsfontosságú az éghajlatvédelmi célok elérésében és a fenntartható fejlődés megvalósításában.

Hivatkozások

- [1] Buss, W., Wurzer, C., Manning, D. A., Rohling, E. J., Borevitz, J., & Mašek, O. (2022). Mineral-enriched biochar delivers enhanced nutrient recovery and carbon dioxide removal. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 67.
- [2] Chen, J. M. (2021). Carbon neutrality: Toward a sustainable future. *The Innovation*, 2(3).
- [3] Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2277-2310.
- [4] Cooley, S. R., Klinsky, S., Morrow, D. R., & Satterfield, T. (2023). Sociotechnical considerations about ocean carbon dioxide removal. *Annual Review of Marine Science*, 15(1), 41-66.
- [5] Deák, Z. (2014). Fenntarthatóság és a fogyasztói társadalom Magyarországon. *GRADUS*, 1(2), 126-132.
- [6] Feng, C., Ye, G., Jiang, Q., Zheng, Y., Chen, G., Wu, J., ... & Fang, K. (2021). The contribution of ocean-based solutions to carbon reduction in China. *Science of the Total Environment*, 797, 149168.
- [7] Hou, C., Zhao, J., Huang, B., Zhou, X., & Zhang, Y. (2024). Microalgae-based technologies for carbon neutralization and pollutant remediation: A comprehensive and systematic review. *Resources, Conservation and Recycling*, 202, 107323.
- [8] Liu, Z., Deng, Z., He, G., Wang, H., Zhang, X., Lin, J., ... & Liang, X. (2022). Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(2), 141-155.
- [9] Mizik, T., & Gyarmati, G. (2021). Economic and sustainability of biodiesel production—a systematic literature review. *Clean Technologies*, 3(1), 19-36.

- [10] Pata, U. K., Kartal, M. T., & Mukhtarov, S. (2024). Technological changes and carbon neutrality targets in European countries: A sustainability approach with Fourier approximations. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 122994.
- [11] Zhong, M. R., Cao, M. Y., & Zou, H. (2022). The carbon reduction effect of ICT: A perspective of factor substitution. *Technological Forecasting and Social Change*, 181, 121754.
- [12] Zhu, J., Lu, Y., Song, Z., Shao, X., & Yue, X. G. (2023). The choice of green manufacturing modes under carbon tax and carbon quota. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135336.
- [13] Wei, Y. M., Chen, K., Kang, J. N., Chen, W., Wang, X. Y., & Zhang, X. (2022). Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review. *Engineering*, 14, 52-63.
- [14] Wu, X., Tian, Z., & Guo, J. (2022). A review of the theoretical research and practical progress of carbon neutrality. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 54-66.