

MEGÚJULÓ FOTOSZINTETIKUS ENERGIATERMELÉS NAPFÉNYBŐL ÉS VÍZBŐL – ELVI LEHETŐSÉG VAGY GYAKORLATI REALITÁS?

Vass Imre

a biológiai tudomány doktora, intézeti igazgató,
MTA SzBK Növénybiológiai Intézet
imre@brc.hu

1. Bevezetés

Napjaink energiaproblémáinak hosszú távú megoldása elképzelhetetlen a megújuló energiaforrások jelenleginél lényegesen nagyobb mértékű kihasználása nélkül. Az emberiség éves energiafelhasználása az utóbbi években kb. 15 TWév (130 000 TWh), ami különböző modellszámítások szerint 2030-ra eléri a 20 TWév-et, és megduplázódik 2050-re (Lewis – Nocera, 2006). Annak ellenére, hogy tisztán az energiaigény szempontjából az ismert és becsült fosszilisenergia-tartalékok összességükben több évszázadra elegendőek lennének, a globális felmelegedést okozó CO₂-emisszió miatt a használatuk további növelése nem járható út. A nukleárisenergia-termelés részesedése a jelenlegi teljes energiaigény kielégítéséből 6% körüli (Lewis – Nocera, 2006), ami még fokozott biztonságú reaktorok kifejlesztése esetén sem futtatható fel akkora mértékben, hogy önmagában fedezze az energiaigény növekedését. Egyrészt a rendelkezésre álló üzemanyag mennyisége limitált (a becsült urániumforrások hagyomá-

nyos reaktorokban felhasználva összesen kb. 100 TWév elektromos energia előállítására elegendőek [Lewis – Nocera, 2006], azaz 15 TWév-nyi felhasználási ütem mellett hat-hét év alatt elfogynának). Másrészt, 15 TW teljesítménynövekmény létrehozása 2050-ig az elkövetkező negyven év minden egyes napján egy 1 GW-os nukleáris erőmű üzembe helyezését igényelné, ami történelmi mértékben példátlan építési igényt jelentene.

Földünkön a legnagyobb potenciálú megújuló energiaforrást a Napból származó fényenergia képviseli, ami a Föld egészére vonatkozóan éves átlagban 150 000 TW teljesítményt jelent. Így kevesebb, mint egy óra alatt érkezik a Napból a Föld felszínére az emberiség jelenlegi éves igényeit potenciálisan kielégítő energiamennyiség. A napenergia további előnye, hogy a sarkvidéki régióktól eltekintve a Földön mindenütt, jórészt egyenletesen, mindenki számára rendelkezésre áll. A napenergia nyilvánvalónak látszó hátránya viszont a kicsiny teljesítménysűrűség, ami a Föld felszínén, a teljes területre éves átlagban számítva 160 Wm². Ennek ellenére a 15 TWév

globális energiaigény kielégítése reális, 10%-os átalakítási hatékonyságot feltételezve a kontinensek összterületének csak 0,6%-át igényelné napenergia-átalakító rendszerek céljára. Magyarország esetén pedig a teljes energiaigény (287 TWh) az ország területének 1,7%-án lenne fedezhető (10%-os hatékonyságot és 1760 kWhm⁻² átlagos napenergia-sűrűséget feltételezve). A napenergia átalakítására számos módszer ismert. Ezek közül gyakorlati hasznosításra jelenleg a közvetlen hőhatáson alapuló napkollektorok, a fotoelektromos hatáson alapuló fénylemelek, valamint a természetes fotoszintetikus rendszerek alkalmazásait a *Magyar Tudomány* nemrégiben tekintette át (Farkas, 2010).

A megújuló energiaforrások közös problémája a rendelkezésre állás folyamatosan változó, kiszámíthatatlan jellege. Ehhez járul még az, hogy a globális energiaigény 25–30%-a a közlekedés igényeinek kielégítésére szükséges, és csak kb. 10–15%-a az elektromos energia. Ezért kívánatos, hogy a megújuló energiatermelés elektromos áram helyett tárolható üzemanyagot eredményezzen. Ez az elvárás érvényes a napenergia hasznosítása esetén is, ami limitálja a napfényből elektromos áramot termelő napkollektorok és fénylemelek alkalmazását a globális energiaproblémák megoldásában.

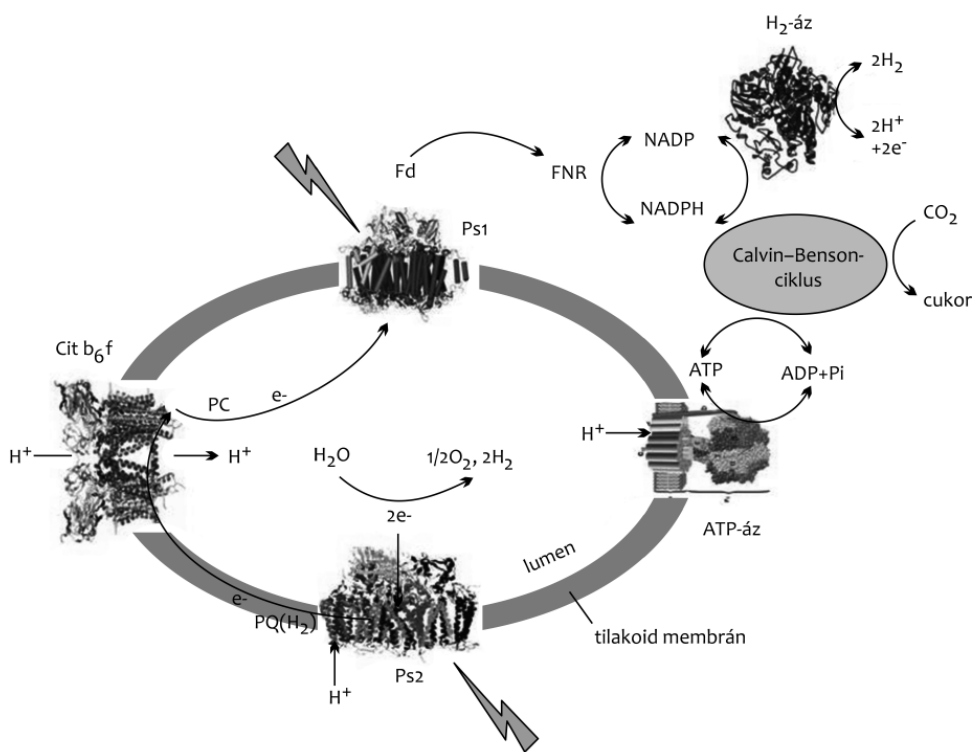
Földünkön a legnagyobb napenergia-átalakító rendszert a természetes fotoszintézis képviseli. Ezen folyamat során a zöld növények, algák és fotoszintetikus baktériumok a Nap fényenergiáját a légköri CO₂ szerves anyagokba történő beépítésére használják fel a vízből vagy más szerves elektronforrásból származó elektronok felhasználásával. A fotoszintézis által a szintetizált szerves vegyületek kémiai kötéseiben globálisan tárolt napener-

gia 125 TWév-re becsülhető (ami csaknem tízszeresen haladja meg az emberiség jelenlegi energiaigényét). A fotoszintézis mint energiaátalakító és energiataroló folyamat sikere elsősorban abból fakad, hogy a hozzá szükséges nyersanyagok (víz és CO₂), valamint a hajtóerő (napfény) gyakorlatilag kimeríthetetlen mennyiségben állnak rendelkezésre, a szerves vegyületek kötéseiben tárolt energia pedig hosszú időn keresztül felhasználható.

Az elmúlt évek során végzett széleskörű kutatási erőfeszítések nyomán jelentős előrehaladás történt a fotoszintetikus energiaátalakítási folyamat részleteinek megértésében és megújuló energiatermelésre való alkalmazhatóságában. Jelen összefoglaló célja az ezen a területen történt tudományos előrehaladás legfontosabb eredményeinek áttekintése.

2. A fotoszintetikus fényenergia-átalakítási folyamat

A fotoszintézis elsődleges fényenergia-átalakítási folyamatai membránokhoz kötött pigment-fehérje-komplexekben játszódnak le. A növények kloroplasztiszjaiban, valamint az algákban és cianobaktériumokban található tilakoid membránok kétfajta fényenergia-átalakító komplexet (az első, PS_I és a második, PS₂ fotokémiai rendszer), az ún. citokróm b₆f komplexet, valamint ATP-szintáz tartalmaznak (*t. ábra*). A PS₂ végzi a víz fényindukált elbontását, ami biztosítja a CO₂ szerves anyagokba történő beépítéséhez végső soron szükséges protonokat és elektronokat, melléktermékként pedig a magasabbrendű életformák számára elengedhetetlen oxigént. A vízből kivont elektronokat a citokróm b₆f komplex továbbítja a PS_I-hez, ahol egy újabb fényindukált folyamat eredményeként az elektronok nagy redukáló erejű molekulákba (ferredoxin, NADPH) épülnek be, amelyek



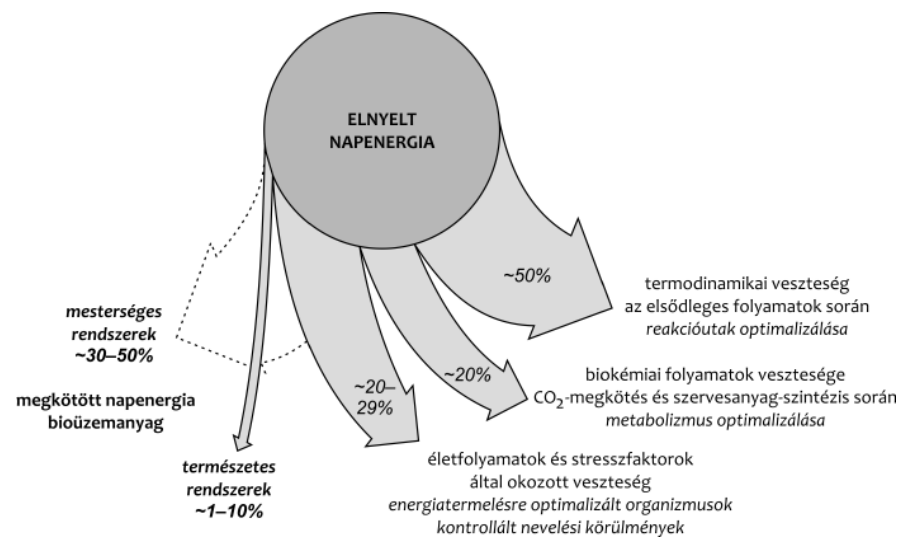
1. ábra • A fotoszintetikus „fényerőmű” fő elemei • A fotoszintetikus fényenergia-átalakítás elsődleges lépései a tilakoid membránba ágyazódott fehérjekomplexekben játszódnak le. A második fotokémiai rendszer (PS2) végzi a víz fényindukált elbontását protonokká, elektronokká és molekuláris oxigénné. Az elektronokat a membrán lipidfázisában diffundáló plasztokinon (PQ) molekulák szállítják a citokróm b_6f komplexhez, ami az elektrontranszporthoz csatlakozóan protonokat pumpál a tilakoid membrán belsejébe. Az első fotokémiai rendszer (PS1) a cit b_6f komplex felől a tilakoid lumenben diffundáló plasztocianin (PC) által szállított elektronokat az elnyelt fényenergia segítségével erősen redukáló potenciálú állapotba hozza, és közvetítő molekulák (ferredoxin – Fd, és ferredoxin NADP⁺ reduktáz – FNR) révén redukált nikotinamid-adenin-dinukleotid-foszfát (NADPH) előállítására használja. A fotoszintézis fényreakcióinak másik nagy energiatartalmú terméke az adenosin-trifoszfát (ATP), ami a fotoszintetikus elektrontranszport folyamatokhoz kapcsolódóan a tilakoidok belső és külső tere között kialakuló proton gradiens felhasználásával az ATP-áz enzim révén képződik. A légköri CO₂ szerves anyagokba történő beépítése az ATP- és NADPH-molekulák felhasználásával az ún. Calvin–Benson-ciklus során történik, aminek kulcsfontosságú enzime a **ribulóz-difoszfát karboxiláz/oxigenáz** (RuBisCo). A szerves anyagok mellett a fotoszintetikus energiaátalakítás és -tárolás másik végterméke a hidrogén, ami szintén a Fd és NADPH által szállított elektronok felhasználásával az egyes zöldalgákban és cianobaktériumokban található hidrogenáz enzim által katalizált folyamatban keletkezik.

a CO₂ megkötéséhez szükségesek. Az ATP-szintáz pedig a szintén a CO₂ megkötéséhez és a sejtek egyéb energiaigényes folyamataihoz szükséges ATP szintézisét végzi. Az elmúlt évek intenzív kutatásainak eredményeként mára ismertté vált a fotoszintetikus fényenergia-átalakításban részt vevő összes fehérjekomplex közel atomi felbontású térszerkezete, ami megnyitotta az utat a nanoméretű fényerőműnek tekinthető fotoszintetikus apparátus működésének szerkezetalapú megértéséhez.

A fotoszintetikus rendszerek energiacélú felhasználásánál alapvető fontosságú kérdés a fényenergia-átalakítás hatékonysága. A PS1- és PS2-komplexekben a nagyon rövid (néhány száz 10^{-9} s-os) időtartományon lejátszódó elsődleges fényenergia-átalakítási lépések közel 100%-os hatékonysággal történnek,

ami az elektrontranszport reakciók során bekövetkező veszteségek miatt fokozatosan csökken. A PS2-komplexen belül a 10^{-3} s-os időskálán bekövetkező stabil töltéstárolás még 50% körüli hatékonyságú, míg a másodperces–perces időtartományon történő CO₂-fixálás szintjén az energiaátalakítási hatékonyság elméleti maximuma 30%-os (2. ábra). Természetes körülmények között a fényenergia fotoszintézis útján történő átalakítása szerves vegyületek kötéseiben tárolt kémiai energiává átlagosan 4,5%-os maximális elvi hatékonysággal történhet (Thorndike, 1996). Az egyik legnagyobb energiaátalakítási hatékonysággal rendelkező természetett növény, a cukornád esetében azonban ez az érték a teljes tenyészidőre számolva csak 1% körüli.

A fotoszintetikus energiaátalakítási hatékonyság csaknem százszoros csökkenése az



2. ábra • A fotoszintetikus fényenergia-átalakítás hatékonysága • Az ábrán a jobbra mutató nyilak a fényenergia-átalakítási folyamat során fellépő fő veszteségi folyamatokat, azok hozzávetőleges mértékét, valamint csökkentésük elvi lehetőségeit (dőlt betűkkel) mutatják. A balra mutató nyilak pedig a mesterséges és természetes fotoszintetikus rendszerekben elérhető energiaátalakítási hatékonyságokat jelentik.

elsődleges folyamatok és a végtermékek szintje között számos tényező következménye (2. ábra). A töltésstabilizálás során bekövetkező veszteségek a termodinamika törvényeiből következnek, amelyek csak a reakció-útvonalak szerkezeti megváltoztatása révén lennének módosíthatók. A stabil töltéstárolástól a CO₂-fixáltság bekövetkező mintegy 20%-os veszteség biokémiai folyamatok eredménye, ami a metabolikus útvonalak optimalizálása révén befolyásolható. A CO₂-megkötés, illetve a biomassza-képződés elméleti maximális hatékonysága és a természetes körülmények között elérhető 1% körüli hatékonyság közötti különbség pedig jórészt a növényi életfunkciók következménye. Ennek fő oka az, hogy a növények nem elsődlegesen energiaátalakításra optimalizált szervezetek. Ezért növekedésük, szaporodásuk, különösképpen pedig a környezeti körülményekhez és stresszhatásokhoz történő adaptációjuk jelentős energiafelhasználást igényel. Így, ezen tényezők optimalizálása révén igen jelentős tartalékok nyílhatnak meg a fotoszintetikus energiaátalakítás hatékonyságának növelésére.

3. Fotoszintézis alapú energiatermelés

A fotoszintetikus rendszerek által átalakított és tárolt napfény energiacélú felhasználásának legfontosabb módszerei a biomassza elégetése vagy bioüzemanyaggá (bioetanol, biodízel) való alakítása, illetve a szervesetlen elektron donorból felszabadított elektronok felhasználása a protonok hidrogénné történő redukciójához.

3.1. Biomassza • Az ipari forradalom kezdete óta fokozódó mértékben felhasznált fosszilis energiahordozók forrása az evolúció korábbi szakaszai során a fotoszintézisből felhalmozódott biomassza. A fosszilis források felhasználása napjainkban olyan mértékű,

hogy jelenleg egy év alatt étetünk el korábban egymillió év fotoszintézisének eredményeként keletkezett fosszilis üzemanyagot, ami a légkörbe kibocsátott CO₂ növekedésének elsődleges forrása. A növényekből származó biomassza elégetése nem növeli a légköri CO₂ mennyiségét a tenyészidővel összemérhető időtávon, feltéve, hogy az adott területről kivágott és elégetett növényeket folyamatosan pótolják. Így a rövid tenyészidejű növényekből származó biomassza közel zérus CO₂-emissziójú energiatermelést tesz lehetővé, amit természetesen ront a biomassza feldolgozásához szükséges fosszilis energiahordozókból származó CO₂-kibocsátás.

A világ nagy százalékban erdővel borított országaiban, mint például Finnország a biomasszából származó megújuló energia az ország szükségleteinek kb. 20%-át fedezi, Magyarország esetében pedig 2005-ben a villamosenergia-termelés 4,8%-a származott biomasszából. A világ legnagyobb energiatermelő és -felhasználó országában, az USA-ban, a biomasszából származó megújuló energia mennyisége 0,1 TWév, ami az ország energiaszükségleteinek kb. 3%-át jelenti. Az USA Energiaügyi (USDOE) és Mezőgazdasági Minisztériumai (USDA) által készített optimista jelentés szerint ez az érték a jelenlegi energiaigény 30%-áig (1 TWév) növelhető (USDA/DOE Report, 2005). Ez az előrejelzés feltételezi új, genetikailag optimalizált energianövények kifejlesztését, valamint élelmiszertermelésre nem használt mezőgazdasági területek és erdészeti melléktermékek hasznosítását.

Jelenleg a legjelentősebb biomassza eredetű bioüzemanyag az etanol, ami cukor és keményítő típusú anyagok fermentációjából származik. A világ bioetanol-termelésének mintegy 90%-a Brazíliából (cukornád) és az

USA-ból (kukorica) származik. Az ország igényeihez képest különösen Brazíliában jelentős a bioetanol-termelés, ahol az összes ténylegesen mezőgazdaságra alkalmas terület 1%-án (3,6 Mha) előállított etanol az ország közötti közlekedésben felhasznált üzemanyag-szükségletének jelentős részét fedezi (kb. 18% [2006] – 50% [2008]). A kedvező természeti adottságok és a cukornád-feldolgozás alacsony gépesítettsége miatt a braziliai cukornádból előállított bioetanol energiahányadosa, azaz az előállított etanol energiataralmának aránya az előállításához szükséges energiához képest igen magas, 8 körüli érték. Ezzel szemben az USA-ban kukoricakeményítőből előállított etanol energiahányadosa csak 1,3 körüli.

A magasabb rendű növények biomaszájából kinyerhető első generációs bioüzemanyagok, a bioetanol vagy biodízel több szempontból sem jelentenek optimális megoldást. Egyrészt alacsony a biomaszába történő fotoszintetikus fényenergia-átalakítás hatékonysága. Másrészt jelentős probléma a fennmaradó biomassza hasznosítása, mivel a jelenlegi technológiák csak a sejtek cukor-, keményítő- és lipidtartalmának átalakítására alkalmasak. Ehhez járul még, hogy a hagyományos bioüzemanyagok előállításához elengedhetetlen az élelmiszertermelésre alkalmas területek használata. Mindezen tényezők, valamint a nem művelt területek energiacélú növénytermelésbe való bevonása miatt jelentkező ökológiai károsodás (biodiverzitás csökkenése) és a globális klimatikus hatások (fokozott szénvisszaforgatás és üvegházgáz-emisszió) miatt a növényi biomassza energiacélú előállítása és felhasználása nem jelent hosszú távú megoldást a globális energiaproblémára.

Ezen problémák ellenére a jelenleginél magasabb biomassza-produkciós hatékonysággal rendelkező növények létrehozása és a

ligno-cellulóz-alapú etanolelőállítás megvalósítása révén történő hatékony, második generációs bioüzemanyag-előállítás kifejlesztése esetén – amelyre az első ipari szintű eljárások napjainkra már megjelentek – a biomassza alapú megújuló energiatermelésnek fontos szerepe lehet mezőgazdasági melléktermékek felhasználásában és a fejlett mezőgazdasággal rendelkező országok kiegészítő energiatermelésében.

3.2. Hidrogéntermelés fotoszintetikus rendszerekkel • Mint a fentiekben már említettük, a fotoszintetikus napenergia-hasznosításra irányuló kutatások elsődleges célja tárolható üzemanyag előállítása mezőgazdasági tevékenységre nem alkalmas területek felhasználásával. A tárolható üzemanyagok közül különleges jelentőségű a hidrogén, ami üzemanyagcellákban környezetszennyező anyagok kibocsátása nélkül használható energiatermelésre, illetve megfelelően kialakított belső égésű motorokban vízzé „elégetve” zéró emissziójú közlekedésre. A fotoszintetikus úton történő közvetlen H₂-termelés azért is jelentős, mivel ily módon a biomassza-képződés limitáló lépései kikerülhetők, és maximálisan 40%-os elvi energiaátalakítási hatásfok érhető el (Prince – Khesghi, 2005), szemben a biomassza max. 4,5%-os elvi energiaátalakítási hatásfokával, illetve a biomasszából történő H₂-előállítás 1%-os maximális hatásfokával (National Research Council – National Academy of Engineering, 2004). Ezért jelentős kutatási erőfeszítések irányulnak a fotoszintetikus rendszerekben történő H₂-termelés hatékony megvalósítására és optimalizálására. A H₂-előállítás történhet H₂ termelésre optimalizált természetes organizmusokkal, izolált fotoszintetikus komplexek felhasználásával létrehozott fél mesterséges rendszerekkel, illetve a természetes rendszerek mű-

ködésén alapuló, bioinspirált szintetikus rendszerekkel.

3.2.1. *H₂-termelésre optimalizált természetes rendszerek* • Számos fotoszintetizáló szervezet (elsősorban oxigéntermelő cianobaktériumok és zöld algák) tartalmaz egy vagy több, különböző típusú hidrogenáz enzimet, amelyek a protonok H₂-gázzá történő redukcióját katalizálják a vízbontásból származó elektronok felhasználásával (Tamagnini et al., 2007). Hidrogénképződés a mellékterméke a nitrogénáz enzimek működésének is, amelyek segítségével a légköri N₂ megkötése történik. Annak ellenére, hogy a hidrogenáz enzimek általában igen nagy aktivitásúak (6000 H₂ molekula/s [Sanderson, 2008]) a maximális fotoszintetikus H₂-termelés hatékony megvalósítását jelenleg még több tényező gátolja. Egyrészt a hidrogenázok oxigén jelenlétében reverzibilisen vagy irreverzibilisen inaktiválódnak. Másrészt: természetes körülmények között a H₂-képződés súlya általában igen kicsi a fotoszintézis fényindukált folyamataihoz csatlakozó metabolikus folyamatokban. További hatékonyságcsökkenő tényező a természetes fotoszintetikus rendszerek nagyméretű fénybegyűjtő antennája, ami a bioreaktorokban nevelt algakultúrák belsejében levő sejteket leárnyékolja. A fentiek alapján a természetes fotoszintetikus rendszerekkel történő H₂-termeléssel kapcsolatos legfontosabb kutatási feladatok: (1) A hidrogenáz enzimek oxigénérzékenységének csökkentése, ami például az enzim katalitikus helyéhez vezető csatorna átmérőjének irányított mutagenézissel történő megváltoztatásával érhető el. (2) A fotoszintetikus folyamatokból származó elektronok hatékony elirányítása a hidrogén-metabolizmus irányába, ami a hidrogenáz és Calvin-ciklus enzimek működésének metabolikus *engineering* révén történő

összehangolásával biztosítható. (3) Gyakorlati megközelítések kidolgozása, és az optimalizálás révén elérhető hatékonyságnövelés.

3.2.2. *Félmesterséges fotoszintetikus rendszerek* • A természetes fotoszintetikus rendszerekben végbemenő életfolyamatok által az energiaátalakítási hatékonyságban okozott csökkenés kiküszöbölésének egyik lehetséges módja a közvetlen fényenergia-átalakítást végző fotokémiai rendszerek (PSI és PS2) kivonása és különböző hordozó felületeken (például: aranyelektrod, szilíciumpórusok) történő immobilizálása (Esper – Badura, 2006). Az így létrehozott félmesterséges rendszerek nagy elvi energiaátalakítási hatékonyságot biztosítanak, elvesztik viszont az élő rendszerek folytonos megújulóképességét. Ezért fontos megoldandó problémát jelent ezen rendszerek stabilitásának jelentős növekedése, és a fény mint nagy energiatartalmú szubsztrát kezeléséből származó fényérzékenység csökkentése.

3.2.3. *Bioinspirált, mesterséges fotoszintetikus rendszerek* • A fotoszintézis-alapú energia- és üzemanyag-termelés talán legperspektivikusabb, de egyben a legnagyobb tudományos kihívást is jelentő megközelítése a természetes rendszerek működésének megértésén alapuló bioinspirált mesterséges rendszerek kifejlesztése, amelyek képesek a Nap fényenergiáját vízbontásra és hidrogénfejlesztésre hasznosítani. Ez lehetővé tenné nemcsak az élő rendszerekre jellemző energiaátalakítási hatékonyságcsökkenés és a fotoszintetikus komplexek félmesterséges rendszerekben tapasztalható limitált stabilitásának kiküszöbölését, de az elektrontranszport reakcióutak optimális tervezése révén növelhetné az elsődleges folyamatok hatékonyságát is. Az ilyen irányú kutatások eredményeként már sikerült létrehozni hidrogenáz aktivitással rendelkező –

azaz hidrogéntermelésre alkalmas – szintetikus komplexeket (Tard et al., 2005). A PS2-ben lejátszódó fényindukált elektrontranszport elsődleges lépéseit utánzó szintetikus komplexeket is sikerült már kifejleszteni (Xu et al., 2005), noha ezen rendszerek vízbontási képességének elérése még további kutatásokat igényel. A közelmúlt lényeges eredménye volt egy megvilágítás hatására külső elektromos feszültség jelenlétében hatékony vízbontást produkáló, és emiatt energiátárolásra alkalmazható, szintetikus fotoelektro-katalizátor létrehozása (Kanan – Nocera, 2008). Kifejlesztés alatt vannak továbbá olyan, a fotoszintetikus rendszerek elvei által inspirált szilárdtest-alapú eszközök is, amelyek vízbontásra és H₂-fejlesztésre is képesek (Sanderson, 2008).

3.3. *Folyékony üzemanyag termelése természetes fotoszintetikus rendszerekkel* • A hidrogén igen hasznos, a környezetet nem szennyező üzemanyag, de biztonságos szállítása, tárolása és gépjárművekben történő hasznosítása magas reaktivitása miatt számos technológiai kihívás leküzdését igényli. Ezért jelentős igény mutatkozik a természetes fotoszintetikus rendszerek folyékony üzemanyag előállításra történő alkalmazására. A fenti problémák megoldását jelentheti a fotoszintetikus mikroorganizmusok metabolizmusának olyan módosítása, amelynek eredményeként a fotoszintézis végtermékei között üzemanyagként hasznosítható anyagok jelennek meg. Ezen elv megvalósítására jó lehetőséget nyújt a szintetikus biológia utóbbi években bekövetkezett nagymértékű fejlődése, ami lehetővé teszi komplett metabolikus utak tervezését és arra alkalmas szerkezetekbe történő bevitelét. A közelmúltban már sikerrel hoztak létre olyan cianobaktérium törzseket, amelyek képesek etanolszintézisre (Deng – Coleman,

1999), illetve biodízel alapanyagként használható zsírsavak túlermelésére (Liu et al., 2010). A keletkezett etanol, illetve a zsírsavak a sejtfalon keresztül a nevelő közegbe diffundálnak, ahonnan kinyerhetők. Így az etanol/zsírsavak előállításához nem szükséges a biomassza feldolgozása, és a rendszer folytonos működésű bioreaktorként működtethető. Az elv demonstrálásán túlmenően azonban a gyakorlati felhasználáshoz a keletkezett etanol/zsírsavak mennyiségének jelentős növelése szükséges. További nagyon lényeges feladat – aminek megoldása a fotoszintézis-alapú hidrogéntermeléshez is szükséges – olyan fotobioreaktorok kifejlesztése, amelyek lehetővé teszik az ipari méretekben történő, optimális fényhasznosítást biztosító algatermelést, beleértve a fénybegyűjtő rendszerek optimalizálását.

4. Következtetések

Az emberiség energiaproblémáinak hosszú távú megoldása elképzelhetetlen a megújuló energiaforrások nagymértékű kihasználása nélkül. A hatalmas mennyiségű és eddig jórészt kihasználatlan napenergia felhasználásának megvalósítása tovább sokáig már nem halogatható probléma. Földünkön a legnagyobb napenergia-átalakító rendszert a természetes fotoszintézis képviseli, amely során a légköri CO₂ épül be szerves anyagokba a vízből kivont elektronok felhasználásával. Jelenleg a fotoszintetikus rendszerek által átalakított és tárolt napfény energiacélú felhasználásának ipari méretekben használható módszerei a biomassza elégetése vagy bioüzemanyaggá (bioetanol, biodízel) való alakítása. Az élelmiszertermelésre alkalmas földterületekre való igényük miatt ezeknek a módszereknek az alkalmazása globális szinten azonban csak átmeneti megoldást jelenthet.

Ezért a fotoszintetikus napenergia-hasznosításra irányuló kutatások elsődleges célja tárolható üzemanyag (hidrogén vagy folyékony szénhidrogén) közvetlen előállítására mezőgazdasági tevékenységre nem alkalmas területeken, energiatermelésre optimalizált természetes vagy mesterséges rendszerekkel. A fotoszintetikus fényenergia-átalakítás mechanizmusának megértésében az utóbbi években elért áttörés, a szintetikus kémia, szintetikus

biológia és nanotechnológia területein bekövetkezett rohamos fejlődéssel együtt jó alapot szolgáltat arra, hogy a biológiai rendszerek által évmilliárdok óta sikerrel használt fényenergia-átalakítási mechanizmusok alkalmazhatók legyenek az emberiség energiaigényeinek közvetlen kielégítésére.

Kulcsszavak: *megújuló energia, napenergia-hasznosítás, fotoszintézis, hidrogéntermelés*

IRODALOM

- Deng, Ming-De – Coleman, John R. (1999): Ethanol Synthesis by Genetic Engineering in Cyanobacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. **65**, 523–528. <http://aem.asm.org/cgi/content/short/65/2/523>
- Esper, Berndt – Badura, Adrian (2006): Photosynthesis as a Power Supply for (Bio-) Hydrogen Production. *Trends in Plant Science*. **11**, 543–549.
- Farkas István (2010): A napenergia hasznosításának hazai lehetőségei. *Magyar Tudomány*. 171, 937–946. <http://www.matud.iif.hu/2010/08/05.htm>
- Kanan, Matthew – Nocera, Daniel G. (2008): In Situ Formation of an Oxygen-Evolving Catalyst In Neutral Water Containing Phosphate and CO₂. *Science*. **321**, 1072–1075.
- Lewis, Nathan S. – Nocera, Daniel G. (2006): Powering The Planet: Chemical Challenges In Solar Energy Utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. **103**, 15729–15735. <http://www.pnas.org/content/103/43/15729.full.pdf+html>
- Liu, Xinyao – Brune, D. – Vermaas, W. – Curtiss, R. (2010): Production and Secretion of Fatty Acids in Genetically Engineered Cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, published ahead of print, doi:10.1073/pnas.1001946107.
- National Research Council – National Academy of Engineering (2004): *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*. National Research Council – National Academy of Engineering, National Academies Press, Washington, D. C.
- Prince, R. C. – Kleshgi, H. S. (2005): The Photobiological Production of Hydrogen: Potential Efficiency and Effectiveness as a Renewable Fuel. *Critical Reviews in Microbiology*. **31**, 19–31.
- Sanderson, Katherine (2008): The Photon Trap. *Nature* **452**, 400–402. <http://www.nature.com/news/2008/080326/full/452400a.html>
- Tamagnini, Paula – Leitão, E. – Oliveira, P. – Ferreira, D. – Pinto, F. – Harris, D. J. – Heidorn, T. – Lindblad, P. (2007): Cyanobacterial Hydrogenases: Diversity, Regulation and Applications. *FEMS Microbiol. Rev.* **31**, 692–720. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1574-6976.2007.00085.x/pdf>
- Tard, Cédric – Liu, X. M. – Ibrahim, S. K. – Bruschi, M. – De Gioia, L. – Davies, S. C. – Yang, X. – Wang, L. S. – Sowers, G. – Pickett, C. J. (2005): Synthesis of the H-cluster Framework of Iron-Only Hydrogenase. *Nature*. **433**, 610–613. <http://www.nature.com/nature/journal/v433/n7026/abs/nature03298.html>
- Thorndike, Edward H. (1996): *Energy and the Environment. A Primer for Scientists and Engineers*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- USDA/DOE Report (2005) *A Billion to Feedstock Supply for a Bioenergy and Bioproducts Industry*.
- Wijffels, René – Barbosa, Maria J. (2010) An Outlook on Microalgal Biofuels. *Science*. **329**, 796–799.
- Xu, Yunhua – Eilers, G. – Borgström, M. – Pan, J.-X. – Abrahamsson, M. – Magnuson, A. – Lomoth, R. – Bergquist, J. – Polívka, T. – Sun, L.-C. – Sundström, V. – Styring, S. – Hammarström, L. – Åkermark, B. (2005): Synthesis and Characterization of Dinuclear Ruthenium Complexes Covalently Linked to Ru-II Tris-bipyridine: An Approach to Mimics of the Donor Side of Photosystem II. *Chemistry A European Journal*. **11**, 7305–7314.

AZ EURÓPAI UNIÓ TÉRKÉPI ÁBRÁZOLÁSA OPTIMÁLIS VETÜLETBEN

Györffy János Klinghammer István

egyetemi docens

egyetemi tanár, az MTA rendes tagja
klinghammer@map.elte.hu

ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Tanszék
terkepi@ludens.elte.hu

A *geoinformatikai* rendszerek létrejötte megerősítette, hogy továbbra is a *térképek* maradnak a térbeli vonatkozások, összefüggések és eloszlások bemutatásának mással nem pótolható eszközei. Az EU politikai, gazdasági és igazgatási szervezetei nagy számban igényelnek jól áttekinthető *tematikus térképeket* a közösség társadalmi-gazdasági jelenségei térbeli összefüggéseinek ábrázolására. E térképeknek nemcsak a természeti földrajzi viszonyokról, az erőforrás-kutatás eredményeiről és a környezet állapotáról kell tájékoztatniuk, hanem az Unió népességéről, annak nemzeti, nyelvi és vallási eloszlásáról, a régiók területi kapcsolatairól, az országok foglalkozási szerkezetéről és gazdasági helyzetéről is.

Egy-egy ilyen térképnek az Unió területét úgy kell megjelenítenie a síkban, hogy a különböző régiók, sőt mind a 27 tagállam területe megfelelő módon összehasonlítható legyen egymással. Ne érje olyan szemrehányás a térképszerkesztőt, hogy a tagállamok együttes ábrázolásánál néhány ország hátrányára torzítja a valós térbeli viszonyokat, megváltoztatja a földgömbön látható képet, és ezzel sérti az ókortól ismert *hasonlósági elvet*: a gömbi kép és a síkba leképezett kép egymásnak megfelelését.

Vizsgálatunk arra irányult, hogy meghatározzuk a hasonlósági elvnek legjobban megfelelő, a legelőnyösebb torzulású *földrajzi vetületet* (Györffy – Klinghammer, 2004).

A vizsgálat módszere

A legalkalmasabb vetület kiválasztása három lépésben történt:

1. *Az ábrázolandó terület pontos körülhatárolása, és ehhez egy közelítő szabályos alapfelületi idom meghatározása* • A vetületi torzulási számításokhoz az Európai Unió területét szabályos geometriai idommal, kerek értékű hosszúsági és szélességi körökkel határolt *foktrapézzal* közelítettük. Javaslatunk egy olyan **G**-vel jelölt foktrapéz, amelyet délről a 35°, északról a 70° É-i szélességi (paralel-) kör, nyugatról a 10° Ny-i, keletről a 30° K-i hosszúsági kör (meridián) határol.² A középme-

¹ A tagállamoknak az európai kontinensre eső törzsterületére szorítkoztunk, hozzászámítva még a Brit-szigeteket és a Földközi-tenger szigetein fekvő országokat, így Máltát és Ciprust.

² E foktrapéz lényegében az Európai Unió egész törzsterületét tartalmazza, kivéve Írország, Norvégia és Finnország kisebb területrészeit, valamint Ciprust. Ez utóbbinak a foktrapézba való bevonása túl sok redundáns területet eredményezne, ezért melléktérképként illeszthető a térképlaphoz.