

Székely György

■ Massachusetts Institute of Technology (MIT), King Abdullah University of Science and Technology (KAUST)

| gyorgy.székely@mit.edu

Membrántechnológia a fenntartható fejlődés szolgálatában

A modern épített környezet megértéséhez közelebből is meg kell vizsgálnunk azokat a láthatatlan gátakat, amelyek mindent lehetővé teszik. Ezeket a gátakat membránoknak nevezzük. Bár a szó hallatán sokaknak a középiskolai biológiaórák és az élő sejtek külső rétegei jutnak eszébe, az ipari membránok komplex, szintetikus anyagok, amelyek kifinomult mikroszkopikus és nanoszkopikus szitaként működnek. Csendben, a háttérben dolgozva szinte minden jelentős globális iparág megkérdőjelezhetetlen részét képezik. Amikor megiszunk egy pohár csapvizet, azt nagy valószínűséggel egy membrán tisztította meg. Amikor a gyógyszeripar életmentő gyógyszereket gyárt, membránokat használnak az aktív hatóanyagok és a mérgező melléktermékek elválasztására. A membránok kritikus fontosságúak a petrokémiai finomításban, az élelmiszer- és italgyártásban, a törvényszéki kémiában, a mesterséges szervek esetében, sőt még a Nemzetközi Űrállomás nedvességet újrahasznosító létfenntartó rendszereiben is.

Alapvetően a membrán funkciója az anyagok elválasztása. Azonban egy egyszerű kávéfilterrel ellentétben – amely kizárólag a fizikai lyukméretre támaszkodik a kávézacc kiszűrésére – a fejlett ipari membránok sokkal komplexebb szinten működnek. Bonyolult kémiai kölcsönhatások, elektromos töltések és molekuláris affinitások alapján választják el a folyadék- vagy gázáramok molekuláit. Ez a szelektív permeabilitás – az a képesség, hogy a vizet átengedi, de a sóionokat blokkolja, vagy a szén-dioxidot átengedi, de a nitrogént nem – hihetetlenül sokoldalúvá teszi a membrántechnológiát.

Ami még ennél is fontosabb, hogy a membránokat környezetbarát technológiaként tartják számon, mivel az alternatívákhoz képest energiahatékonyak. A hagyományos termikus elválasztási módszerek, mint például a desztilláció vagy a bepárlás, nagy mennyiségű hőt és energiát igényelnek.[1] Azzal, hogy a membránok szobahőmérsékleten, általában egy szivattyú nyomásának segítségével szűrik meg az anyagokat, az iparágak hatalmas mennyiségű villamos energiát takarítanak meg, és évente több millió tonna üvegházhatású gáz kibocsátását előzik meg.

Ennek a láthatatlan infrastruktúrának a gazdasági súlya is óriási. 2025-ben a globális membránpiac értékét 67 milliárd dollárra becsülték, és az előrejelzések szerint 2033-ra ez az összeg 107 milliárd dollárra fog ugrani a hatékony elválasztási és vízkezelési technológiák iránti növekvő globális igény miatt. Ez a gyors piaci expanzió egybeesik a 2026-ot meghatározó globális fenntarthatósági trendekkel. Az iparágakban a fenntarthatóság a jelentésektől a mérhető végrehajtás, a pénzügyi realizmus és a kézelfogható üzleti érték felé tolódik el. A körforgásos gazdaság ma már nem utópisztikus, hanem a tervezésvezérelt rendszer része, amely közvetlenül beépül a hosszú távú működési rugalmasságba és a versenyelőnybe.

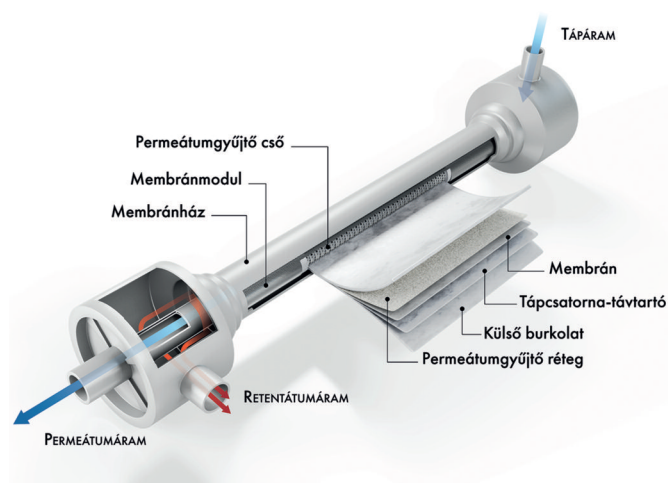
A membránipar azonban jelenleg egy kényelmetlen paradoxonnal küzd. Bár a membránok létfontosságú eszközök a környezetvédelem, az erőforrás-megőrzés és a vízhiány elleni küzdelem terén, az előállításukhoz használt hagyományos gyártási folyamatok fenntarthatósága megkérdőjelezhető.

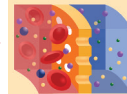
A hagyományos polimer membránok gyártása erősen támaszkodik a fosszilis tüzelőanyagokból származó műanyagokra, reaktív felületmódosítókra és mérgező oldószerekre. A gyártási folyamat során több millió liter veszélyes szennyvíz keletkezik, amelyet gondosan kell kezelni az ökológiai szennyeződés elkerülése érdekében. Továbbá, amikor ezek a membránok elérik az élettartamuk végét, szinte soha nem hasznosítják újra őket. Az elhasznált membránok túlnyomó többsége hulladéklerakókba kerül vagy elégetik őket, amivel mérgező melléktermékek jutnak a légkörbe.

Ezt a kirívó ellentmondást felismerve, a tudományos és mérnöki membránközösségek egy átfogó, iparágra kiterjedő paradigmaváltást indítottak el. Ma már láthatjuk a mesterséges intelligencia integrálását a kémiai elválasztások előrejelzésére és optimalizálására, az emberi bőrhöz hasonlóan öngyógyító műanyagok kifejlesztését, valamint a teljes egészében növényi hulladékból készült anyagok térnyerését a membránok területén.

A zöld membránanyagok és -folyamatok 12 alapelve egy kevertrendszert fektet le, ami iránymutatást ad az anyag- és a folyamatmérnöki tudományok oldaláról egy fenntarthatóbb jövő érdekében. Ez azzal érvel, hogy a membránokat nem csupán ipari eszközként kell kezelni, hanem a globális fenntarthatóság három alappillére – a gazdaság, a környezet és a társadalom – mentén kell értékelni.[2]

1. ábra. A hagyományos membránmodul részei





A hagyományos membránmodulok bonyolult, többrétegű szendvicsek. Tartalmaznak egy ultravékony szelektív réteget, amely a tényleges szűrést végzi, egy vastagabb porózus hordozóréteget a mechanikai szilárdság érdekében, különféle kémiai ragasztókat, és műanyag távtartókat a folyadék áramlásának irányítására (1. ábra). A fenntarthatóság filozófiája megkívánja, hogy drasztikusan minimalizáljuk az ezekben a szerelvényekben használt különböző kémiai összetevők számát és vegyük figyelembe azok toxicitását.

Továbbá szorgalmazzuk a véges, kőolajalapú műanyagokról, adalékanyagokról és oldószerekről a megújuló, bioalapú anyagokra való áttérést. Kihívás elé állítja az iparágot, hogy ne támaszkodjon többé a gyártási folyamat során a mérgező oldószerekre. A cél a természet által ihletett membránok tervezése, olyan vegyületek felhasználásával, amelyek biztonságosak mind a gyártási és felhasználási oldalon dolgozó ipari munkások, mind pedig a környezet számára.

Még a legzöldebb membrán is fenntarthatatlan, ha hatalmas mennyiségű elektromos áramot igényel a folyadék átréselése rajta. Egy hagyományos vízkezelő- vagy vegyipari üzemben a folyadékokat egymást követő szakaszok labirintusán pumpálják át, hatalmas átmeneti puffertartályokban tárolják, és gyakran kémiai előkezelésnek vetik alá.

A zöld keretrendszer ezen közbenső lépések kiküszöbölése mellett érvel. Olyan rendkívül hatékony membránok tervezésével, amelyek egyetlen lépésben elvégzik a feladatot, a létesítmények drámaian csökkenthetik az ökológiai lábnyomukat. Ezenkívül a membránokat úgy kell megtervezni, hogy minél közelebb működjenek a környezeti körülményekhez (szobahőmérsékleten és normál légköri nyomáson), minimalizálva a szükséges energiát. Ennek elérése érdekében az iparág egyre inkább a fejlett automatizálás, a digitális szenzorok és a mesterséges intelligencia felé fordul, hogy valós időben nyomon kövessék a membrán állapotát, biztosítva a csúcshatékony működést áram- vagy vízpazarlás nélkül.

Eddig alapvetően a mérnököket csak a membrán teljesítménye érdekelte az aktív működés során. Az új paradigma a *bölcsőtől a sírig*, vagy ideális esetben a körforgásos *bölcsőtől a bölcsőig*, gondolkodásmódot követeli meg. A hulladékkezelési hierarchia ennek része. Az abszolút legmagasabb prioritás az újrahasználat, amely magában foglalja csak kismértékben használt membrán megtisztítását és kevésbé fontos alkalmazásban való ismételt bevetését. A következő preferált lépés az értéknövelő újrahasznosítás, amely az elhasznált anyagot egy új, magasabb értékű terméké alakítja. Ha ez sikertelen, a membrán anyagát újra kell hasznosítani, vagy depolimerizálni kell, ami a műanyag alapvető építőelemeire való lebontását jelenti új membránok szintetizálásához. Ha a kémiai újrahasznosítás lehetetlen, az anyagot úgy kell megtervezni, hogy természetes úton biológiailag lebomoljon. Csak akkor szabad a membránt a legvégső megoldásnak alávetni (biztonságos ártalmatlanítás, hulladéklerakás vagy égetés), ha az összes többi lehetőség kimerült.

A legtöbb membrán előállítása fázis inverzióval történik. Ami a vegyészmérnöki tudományok briliáns teljesítménye, az egyben egy ökológiai rémálom. A szükséges műanyagok feloldásához használt oldószerek, mint például az *N*-metil-2-pirro-

lidon és az *N,N*-dimetilformamid, nemkívánatosak fenntarthatósági szempontból. Ezek a dipoláris aprotikus oldószerek mérgezőek a vízi élővilágra, felhalmozódnak a környezetben, és súlyos reprodukciós és fejlődési egészségügyi kockázatot jelentenek a velük dolgozó gyári munkások számára. Globálisan a membrángyártó ipar évente több mint 50 milliárd liter, ezen veszélyes oldószerekkel szennyezett szennyvizet termel.[3]

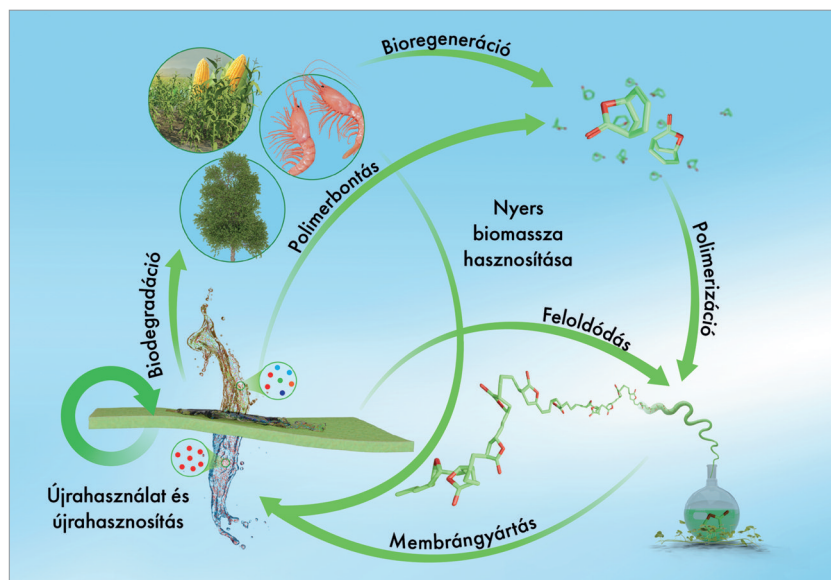
A fenntarthatóság iránti törekvés indította el a zöld oldószerek utáni kutatást. Ebben a kontextusban ezek olyan alternatív oldószerek, amelyek képesek feloldani a műanyagokat, de megújuló biomasszából származnak, minimális toxicitást mutatnak, és biológiailag könnyen lebonthatók. Az elmúlt években számos ilyen zöld oldószer lépett elő kísérleti érdekességből életképes ipari alternatívává, például a cyrene, a γ -valerolakton, az etil-laktát, illetve az *N*-butil-2-pirrolidon.

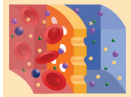
A zöld oldószerekre való áttérés azonban nem pusztán fenntarthatósági, hanem tudományos és gazdasági kihívás is. Bár az olyan oldószerek, mint az etil-laktát, viszonylag megfizethetők, sok nagy méretben szintetizált zöld oldószer továbbra is drágább, rosszabb az ellátási láncának a megbízhatósága, és gyártási tételekenti eltérése nagyobb, mint a kőolajalapú társaiké. Emiatt a folyamatban lévő kutatások erősen a biomassza-fermentációs folyamatok optimalizálására összpontosítanak, hogy ezen környezetbarát folyadékok költségeit a fosszilis tüzelőanyagok szintjére csökkentse.

A membránipar évtizedekig szinte kizárólag kőolajszármazék típusú műanyagokra támaszkodott, mint például a polivinilidén-fluorid, a poliszulfon és a szintetikus poliamidok. A zöldebb vegyületek iránti kereslet nagy léptékű fejlesztéseket katalizált a biopolimer-alapú membránok terén. A biopolimerek bőségesen rendelkezésre állnak a természetben, biokompatibilisek és hasznos élettartamuk végén gyakran biológiailag lebonthatók (2. ábra).

A cellulóz, ami a növényi sejtfalak elsődleges alkotója, hatalmas reneszánszát éli. Amikor mezőgazdasági hulladékból, például kukoricaszárból vagy búzaszalmából nyerik ki, a cellulóz rendkívül stabil és hidrofíl tulajdonságot biztosít a membránok számára. Hasonlóképpen, a kitozánt, ami egy kitinből származó biopolimer, amely a rákfélék és rovarok külső vázát alkotja, is széles körben alkalmazzák. A kitozán azért is különösen értékes, mert hatékonyan semlegesíti a baktériumokat, természetes mó-

2. ábra. A membrántechnológia fenntarthatósági körfolyamata





don megelőzve a biológiai lerakódást anélkül, hogy mérgező vegyi eredetű tisztítószerre lenne szükség.

A mérnökök egyre inkább a természethez fordulnak tervezési inspirációért. Ezt a koncepciót biomimetikának nevezzük. A biológiai sejtmembránok például az emberi vesében hatékonyan szabályozzák a víz és az ionok áthaladását, specifikus fehérjecsatornákat, például akvaporinokat használva. A kutatók ezen biológiai pórusok molekuláris szerkezetének tanulmányozásával olyan szintetikus programozható membránokat terveznek, amelyek utánnozzák ezt a nagy sebességű, nagy szelektivitású transzportot.

Ezzel párhuzamosan olyan membrán kifejlesztése is napvilágot látott, amely teljes egészében napenergiával működik. Ezen új fémorganikus vázszerkezet-alapú membránok szivacsoként működnek, kevesebb mint 30 perc alatt emberi fogyasztásra alkalmas ivóvizet állítanak elő, és csupán négy perc napfénnel való besugárzással regenerálhatók és tisztíthatók.

A szerves kémikusok számára a membrántudomány legizgalmasabb határterülete a szerves oldószerekben a komplex szerkezetű értékes molekulák szobahőmérsékleten történő elválasztása. Ez a szerves oldószeres nanoszűrő területe. A hagyományos finomkémiai és gyógyszerhatóanyag-gyártás erősen támaszkodik a desztillációra és a bepárlásra a termékek koncentrációjához vagy az oldószerek visszanyeréséhez. Ezek a termikus módszerek azonban rendkívül energiaigényesek, és súlyos kockázatot jelentenek a hőérzékeny szerves molekulák és biológiai anyagok lebomlása szempontjából. A nanoszűrő át alakítja ezt a tájképet. A kémiaiilag ellenálló térhálósított polimerek alkalmazásával a nanoszűrő lehetővé teszi a kémikusok számára a gyógyszerhatóanyagok koncentrációját, a szennyeződések eltávolítását és az értékes homogén organo- és átmenetifém-katalizátorok visszanyerését energiatájaként módon, pusztán nyomás segítségével a destruktív hőkezelés helyett.[4] Továbbá a legújabb membránátörések enantiomertiszta műanyagokból vagy közvetlenül a membránmátrixba integrálva hoztak létre királis szelektorokat, így a mérnökök valódi királis felismerésre képes membránokat alkottak. Ezek a membránok sikeresen elválasztják a gyakori gyógyszerek racém elegyeit. A méretekizárás mellett ezek a membránok közvetlenül az anyagukba beágyazott királis szelektorral való specifikus, aszimmetrikus kölcsönhatások és kötési affinitások kihasználását is lehetővé teszik.

A nanoszűrő felbecsülhetetlen értékűnek bizonyul az olyan gyorsan növekvő gyógyszerfajták szintézisében is, mint az oligo-

nukleotidok és a peptidek. Ezeknek a makromolekuláknak a szilárd fázisú vagy folyadékfázisú szintézise kimagasló mennyiségű oldószert és ismétlődő mosási lépéseket igényel. A membránok aktívan segítik az ismétlődő oldószercserét és a tisztítási lépéseket, drasztikusan csökkentve a szintézis során keletkező veszélyes oldószerr hulladék mennyiségét. E specifikus tisztítási lépések áthelyezésével a hagyományos termikus módszerekről a matematikailag optimalizált membránkonfigurációkra, a gyógyszer-gyárak egy körfolyamatban képesek visszanyerni az oldószereiket, és ezekben a folyamatokban akár 90%-kal csökkenthetik CO₂-kibocsátásukat.

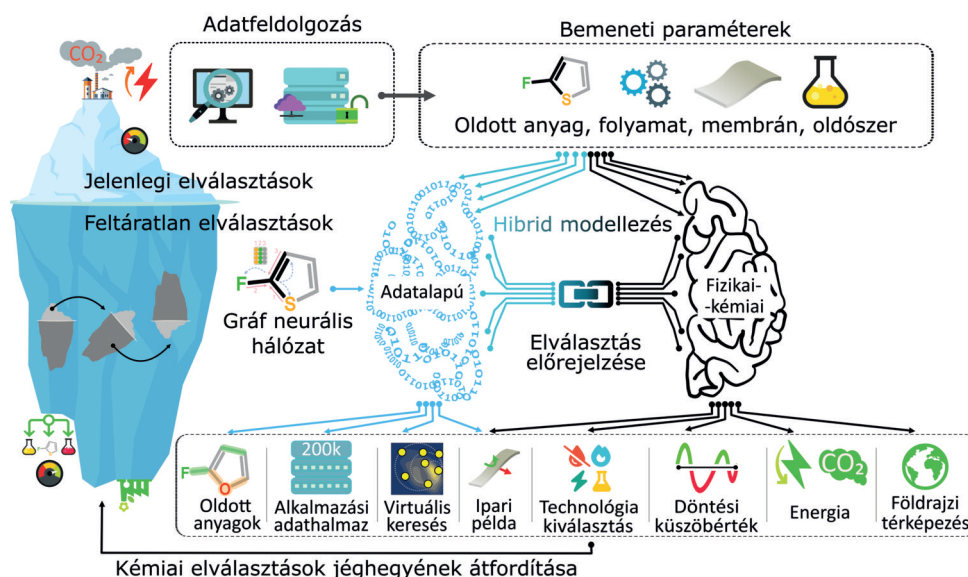
Míg a nehézipar és a víztisztítás négyzetkilométeres nagyságrendben használ membránokat, a gyógyszer- és biotechnológiai szektorok a nano- és mikroszkopikus precizitás miatt támaszkodnak a membránokra. A globális gyógyszeripari membránszűrési piac várhatóan eléri a 13 milliárd dollárt 2026-ban, amelyet a komplex biológiai gyógyszerek, a génterápiák és a szigorú új tisztasági előírások szorgalmaznak.

Ezenkívül az üzenetvivő RNS-vakcinák és a fejlett génszerkesztési terápiák robbanásszerű terjedése alapvetően átalakította a biotechnológiai gyártást. Az *in vitro* transzkripció során előállított üzenetvivő RNS-t aprólékosan meg kell tisztítani az elreagálatlan enzimektől és a mérgező melléktermékektől. Ma az iparág szinte teljesen áttért egy membránalapú technikára, az úgynevezett tangenciális áramlású szűrésre.

A tangenciális áramlású szűrés során a folyadékot nagy sebességgel szivattyúzzák a membrán felületén keresztül, ami megakadályozza, hogy a törekeny üzenetvivő RNS-szálak eltömítsék a mikroszkopikus pórusokat. Az üzemi nyomás és a mosási ciklus optimalizálása lehetővé tette a kutatók számára, hogy az üzenetvivő RNS-termékvesztést 30%-ról mindössze 3%-ra csökkentsék. Ráadásul a biotechnológiai ipar egyre gyakrabban alkalmaz egyszer használatos, újrahasznosítható membránmodulokat, hogy biztosítsák a teljes sterilitást.

A zöld anyagok fejlesztése a membrán anyagának biztosítását oldja meg, de az is kritikus fontosságú, hogy ezek a membránok milyen hatékonysággal működnek a valós problémákban. Hagyományosan az új membránanyagok felfedezése erősen a tapasztalati próba-szerencse módszeren alapult. A mesterséges intelligencia az utóbbi években történő integrálása alapvetően reformálja a membránok területét.

A gépi tanulási algoritmusok kiválóan felismerik a komplex,



3. ábra. A kémiai elválasztások jéghegyének átfordítása modellezési megközelítéssel, amely az energiafelhasználás és a szén-dioxid-kibocsátás szempontjából hasonlítja össze a kémiai elválasztási technológiákat

láthatatlan mintázatokat a nagy méretű adathalmazokban. A mesterséges intelligencia napról napra forradalmasítja a membránok működését a vízkezelő telepeken és a vegyi finomítókban is. A zöld alapelvek erősen támogatják a folyamatanalitikai technológia és az automatizálás integrációját. Amikor a digitális szenzorokat gépi tanulási algoritmusokkal párosítják, a feldolgozó-üzem autonóm, önkorrekciós entitássá válik. A mesterséges intelligencia azonnal képes elemezni a mikroszkopikus anomáliákat az áramlási sebességekben, és képes hetekkel a bekövetkezésük előtt előre jelezni a membrán meghibásodását vagy a súlyos eltömítést. Ahogy az anyagtudomány a mesterséges intelligencia és a zöld kémia széles körű alkalmazása felé tart, a múlt statikus szűrői dinamikus, okos technológiákká fejlődnek, amelyek több iparág kiaknázását is segíthetik (3. ábra).

Ezt az átállást az Európai Unió 2026-ra teljes mértékben elfogadásra kerülő Körforgásos Gazdasági Törvénye (Circular Economy Act) is gyorsítja, amely jelentősen növelni kívánja a másodlagos nyersanyagok használatát. Szigorú újrahasznosított-tartalomra vonatkozó előírásokat vezet be, és a kiterjesztett gyártói

felelősség keretrendszerén keresztül jogilag is a gyártókat teszi pénzügyileg felelőssé termékeikért életciklusuk végén. A hagyományos mechanikai újrahasznosítás mellett az olyan fejlett kémiai újrahasznosítási technológiák elterjedése várható, mint a depolimerizáció, katalitikus krakkolás és pirolízis, amelyek képesek a komplex membránmodulokat feldolgozni.

A membrántudomány gyors fejlődése bizonyítja, hogy a zöld környezetvédelmi szempontok nem a jótékonyági utógondolatok köré tartoznak, hanem a jövő technológiai tervezésének szigorú alapkritériumai. A zöld kémia, a mesterséges intelligencia és a körforgásos gazdaságpolitika szinergiája révén a membrántechnológia ma jó példája annak, hogy az ipar hogyan képes sikeresen újrapozicionálni magát egy fenntartható jövő biztosítása érdekében.



IRODALOM

- [1] D.S. Sholl, R.P. Lively, *Nature*, 2016, 532, 435–437.
- [2] G. Székely, *RSC Sustainability*, 2024, 2, 871–880.
- [3] G. Székely et al., *Green Chemistry*, 2015, 17, 5196–5205.
- [4] G. Székely et al., *Nature Energy*, 2025, 10, 308–317.

Agárdi Tamás

■ AFV Kft.

A fény használata a biztonsági jelek esetében

Fényvisszavető, fluoreszcens, fotolumineszcens és megvilágított biztonsági jelzések

A biztonsági jelzés első feladata nem az, hogy szép legyen, hanem hogy a megfelelő pillanatban észrevegyék. A legszabályosabb piktogram is elveszíti életvédelmi értékét, ha sötétben, füstben, rossz megvilágításnál, nagy távolságból vagy vizuálisan zsúfolt környezetben nem ismerhető fel. Ezért a jelzések tervezésénél a tartalom, a piktogram és a méret mellett külön szakmai kérdés az is, hogyan hívjuk fel a figyelmet a jelre: visszaverje a fényt, erősebben kiemelkedjen nappal, áramszünetben is látszódjon, vagy saját fényforrással legyen megvilágítva.

A magyar munkavédelmi jelzési alapot a munkahelyen alkalmazandó biztonsági és egészségvédelmi jelzésekről szóló 2/1998. (I. 16.) MüM rendelet adja. A rendelet szerint a munkáltató köteles a biztonsági jelzéseket kihelyezni, karbantartani, elhasználódás vagy a munkakörülmények változása esetén cserélni, és a jelzés szükségességének meghatározásakor figyelembe kell venni a kockázatértékelés eredményét. Ez azt jelenti, hogy a láthatósági technológia kiválasztása sem esztétikai kérdés, hanem a használati környezetből, a veszély jellegéből és az észlelési távolságból következő munkavédelmi döntés. Összeszedtük a leggyakrabban használt technológiákat:

A **fényvisszavető jelzés** ott működik jól, ahol van külső fényforrás, amelynek fényét a felület a fényforrás irányába veri vissza. Tipikus példa a közlekedési tábla, a parkolóhely-jel, a kültéri irányjelzés, a kapubejáró melletti figyelmeztető tábla vagy a telephelyen belüli útvonaljelzés, amelyet járműfénycsóró, kézilámpa vagy reflektor világít meg. A fényvisszavető jel nagy előnye, hogy energiaellátás nélkül is látványosan kiemelkedik éjszaka, ködben vagy csökkent látási viszonyok között. Korlátja ugyanak-

kor, hogy saját fényt nem termel: ha nincs ráeső fény, nem lesz mit visszavernie. Ezért menekülési útvonalon, belső sötét terekben vagy áramszünetre méretezett biztonsági rendszerben önmagában nem elegendő.

A **fluoreszcens** jelzések más elven hívják fel magukra a figyelmet. Ezek a felületek a környezeti, különösen az UV-tartalmú fény hatására rendkívül élénknek, „világítóknak” tűnnek. A fluoreszcens sárga, narancs vagy zöld jól használható olyan helyeken, ahol nappal, erős mesterséges fényben vagy változó háttér előtt kell gyors észlelhetőséget biztosítani. Építési területen, targoncaforgalommal terhelt raktárban, karbantartási zónában vagy ideiglenes figyelmeztetésnél a fluoreszcens felület jelentősen növelheti a jel feltűnőségét. Fontos azonban, hogy a fluoreszcens anyag nem azonos az utánvilágítóval: sötétben, megvilágítás nélkül nem ad tartós fényt, hanem a nappali vagy mesterséges fényben fokozza a feltűnést.

A **fotolumineszcens**, közkeletűen **utánvilágító** jelzés már valódi vészhelyzeti logikát képvisel. Az ilyen anyag a környezeti fényből energiát vesz fel, majd a fény megszűnése után fokozatosan visszasugározza azt. Ezért alkalmazzák menekülési útvonalaknál, lépcsőléleknél, ajtókereteknél, alacsonyan vezetett útirányjelzéseknél, tűzvédelmi eszközök kiegészítő jelölésénél vagy olyan helyeken, ahol áramszünet esetén is szükség van vizuális vezetésre. A fotolumineszcens jel nagy előnye, hogy passzív: nem igényel vezetékeztést, akkumulátort vagy aktív fényforrást. A korlátja viszont éppen ebből fakad: csak akkor működik megfelelően, ha előtte elég fényt kapott, és ha a felület tiszta, sértetlen, megfelelő minőségű.