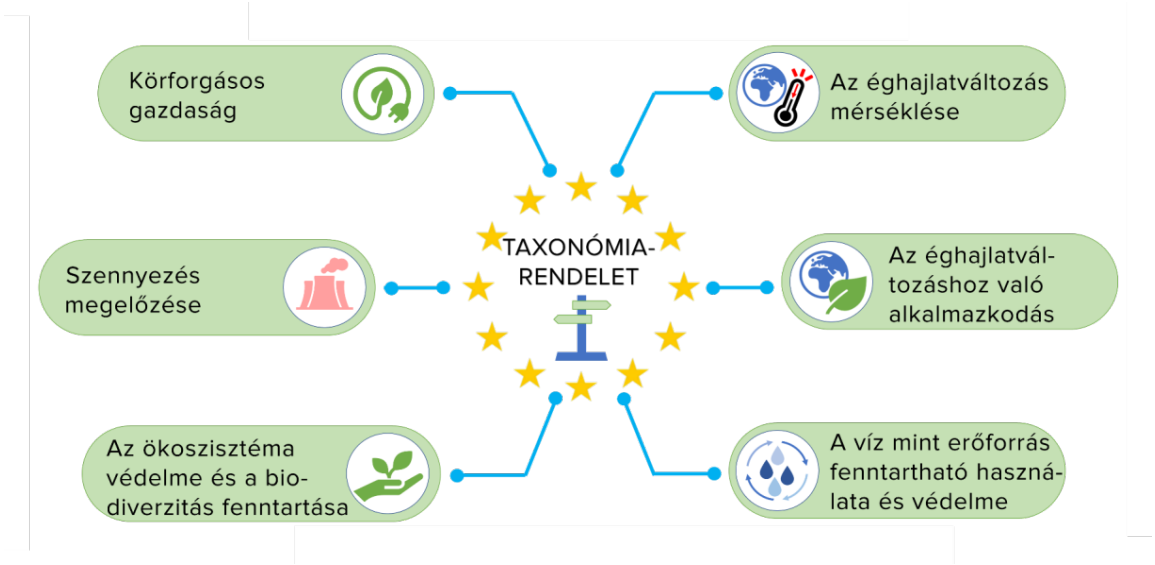
# JRC TANULMÁNY A NUKLEÁRIS ÉS MÁS VILLAMOSENERGIA-TERMELÉSI TECHNOLÓGIÁK KÖRNYEZETI HATÁSAIRÓL

*Kirchkeszner Csaba, Dr. Hugyecz Attila – 2021. április 14.*

A globális felmelegedés és az éghajlatváltozás kezelése egyre nagyobb kihívásokkal állítja szembe az emberiséget, annál is inkább, mert hatásaik egyre több szektorban érzékelhetővé válnak, s jelentős problémákat okoznak. Az éghajlatváltozás okozta kihívások sokasága az Európai Uniót sem kíméli. Így az EU a *Green Deal* program keretében célul tűzte ki, hogy 2050-re teljesen klímasemlegessé válik. Ennek érdekében az Európai Parlament és a Tanács kidolgozta **a fenntartható befektetések előmozdítását célzó 2020/852, ismertebb nevén a taxonómiarendeletet. E szerint egy gazdasági tevékenység, befektetés környezeti szempontból fenntarthatónak minősül akkor, ha lényegi hozzájárulása van a rendelet által meghatározott hat környezeti célkitűzés (1. ábra) valamelyikéhez.**




**1. ábra:** Az EU taxonómiarendeletében meghatározott környezeti célkitűzések (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

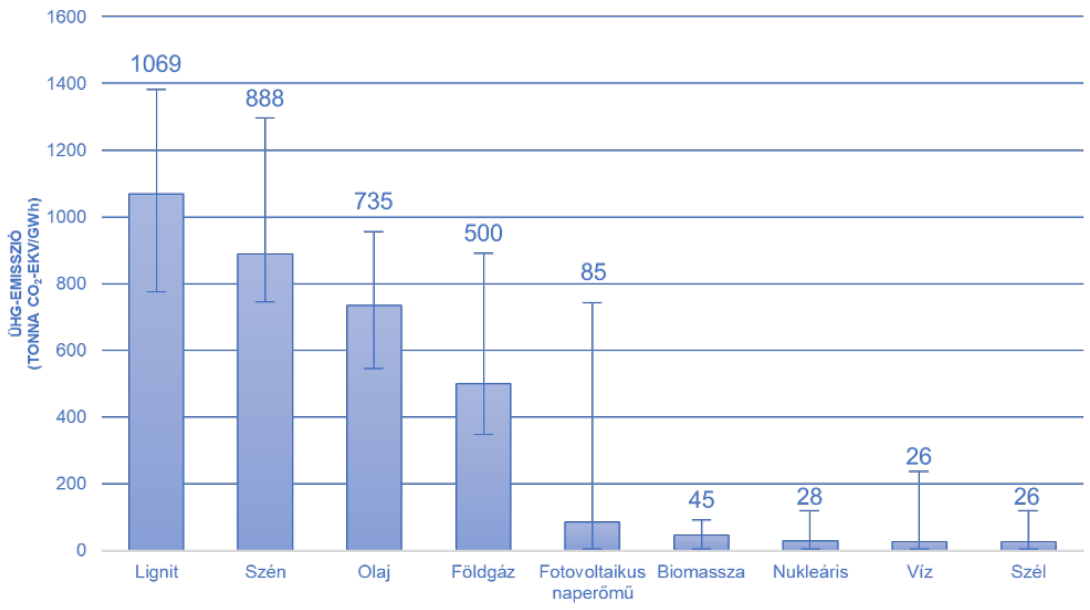
A taxonómiarendeletről folytatott tárgyalások során felmerült a kérdés, hogy **a nukleáris energiára tekinthetünk-e fenntartható befektetésként**. Ennek tisztázására nagy szükség van, hiszen a nukleáris alapokon nyugvó villamosenergia-termelés jelentős mértékben hozzájárulhat az éghajlatváltozás mérsékléséhez. A nukleáris energiatermelés fenntarthatóságának megítélésére az Európai Bizottság felkérte tudományos szolgálatát, a Közös Kutatóközpontot (JRC), mely tudományosan megalapozott elemzéseket végzett, és amelynek eredményei a 2021. március 19-én kiadott jelentésben láttak napvilágot[1].

Az ***Elemző percek*** jelen számában az (atomenergiapártinak egyáltalán nem nevezhető) **Európai Bizottság tudományos műhelye által kiadott tanulmány eredményeit elfogadva és bemutatva összevetjük a nukleáris energia környezeti hatásait más villamosenergia-termelési technológiákkal**. A tanulmány a realitások alapján és azzal a szellemiséggel készült, hogy a villamosenergia-termelésben alkalmazott valamennyi technológia kölcsönhatásba kerül a környezettel, s arra különféle típusú és mértékű hatásokat fejt ki.

## A villamosenergia-termelési technológiák üvegházhatású gázkibocsátásainak összehasonlítása

A JRC tanulmánya alapján először a különböző villamosenergia-termelési módszerek életciklus-elemzés alapján meghatározott ÜHG-kibocsátásait ismertetjük. Az ÜHG-emisszió jellemzésére a globális felmelegedési potenciált (GWP) használjuk, amit szén-dioxid-egyenértékben ($CO_2$-ekvivalens) adnak meg. A főbb villamosenergia-előállító eljárások életciklus-elemzések alapján számított ÜHG-kibocsátási értékekeit a **2. ábrá**n mutatjuk be.

[1] *Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the 'Do Not Significant Harm' Criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*




**2. ábra:** Az egyes villamosenergia-termelési technológiák által kibocsátott ÜHG-k átlagos mennyisége az életciklus-elemzések alapján (JRC tanulmány, Fig. 3.2-6. alapján)

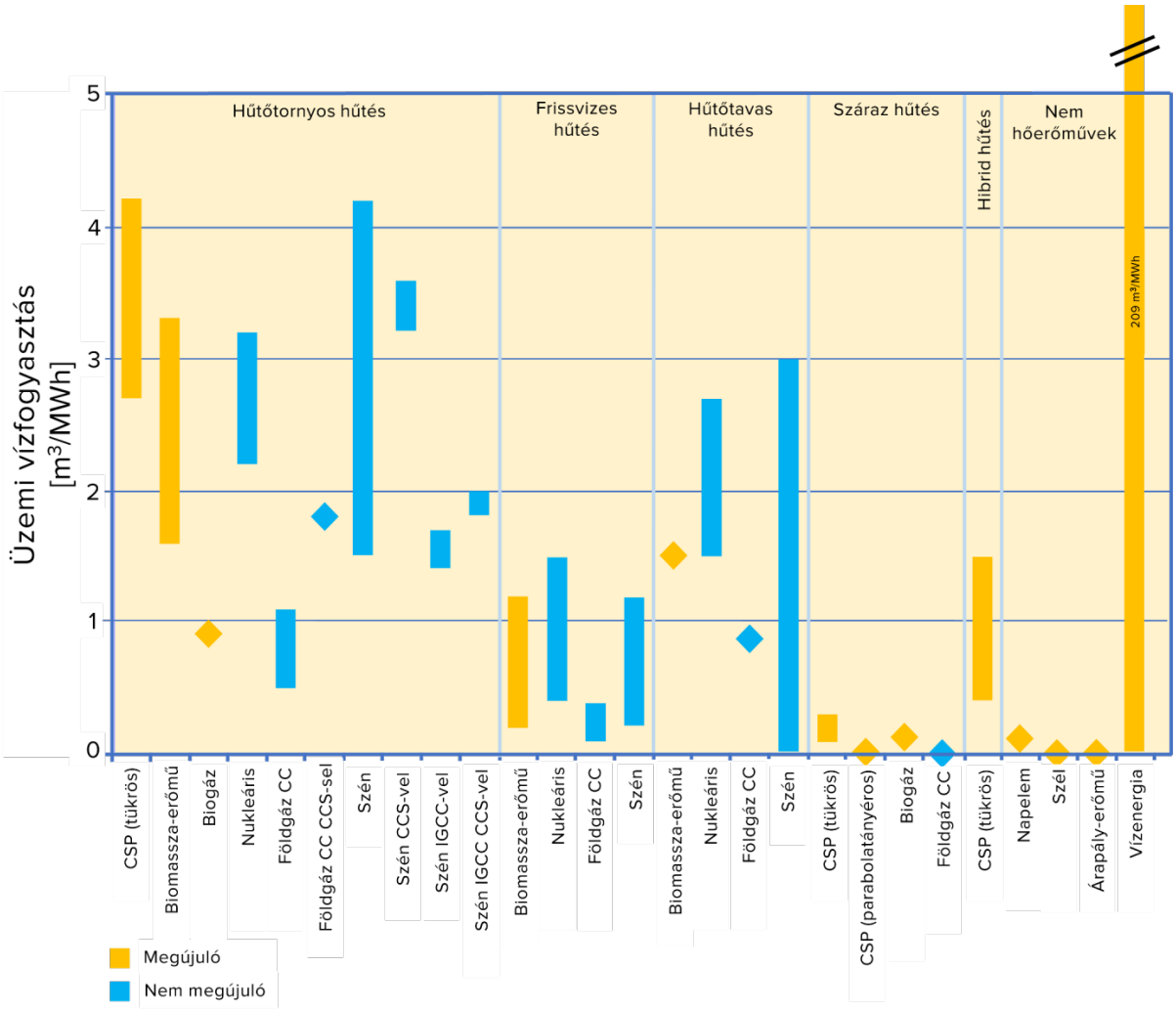
**A JRC által számolt adatok alapján elmondható, hogy a legkisebb ÜHG-kibocsátással a szél-, a víz- és a nukleáris energiatermelési ágazatok rendelkeznek.** Az egyes kibocsátásértékekhez tartozó szórás oka az életciklus során alkalmazott technológiák különbözősége: atomenergetika esetében például a ma már alig alkalmazott gázdiffúziós technológián alapuló urándúsítás nagyobb energiaigényű, mint a gázcentrifugás eljárás, így annak ÜHG-kibocsátása is nagyobb. Az atomenergia teljes életciklus alapú ÜHG-kibocsátását meghatározó további tényező az **uránérc bányászatának energiaigénye, ami elsősorban attól függ, hogy az urán a hordozó kőzetben milyen koncentrációban található meg – ettől függően ugyanis a kapcsolódó ÜHG-kibocsátás más értéket vehet fel**. A jelenleg alkalmazott életciklus-elemzési modellek rosszabb minőségű ércekkel kalkulálnak, mint a ténylegesen rendelkezésre álló uránérckészletek minősége.

Készült elemzés a jelenlegi francia atomreaktor-flotta életciklus szerinti kibocsátására 2010-ben, olyan paraméterekkel, amikor a bányászott uránérc minősége átlagos volt és a dúsítás gázdiffúziós eljárással történt. Ekkor a számítások szerint az ÜHG-emisszió értéke 5,29 g $CO_2$-ekv/kWh volt. Egy másik tanulmányban egy jövőbeni EPR reaktor teljes életciklusának ÜHG-kibocsátását értékelték centrifugás dúsítási eljárást feltételezve. E becslés az előző francia példában említett eredményhez nagyon hasonló eredményt adott (4,25 g $CO_2$-ekv/kWh).

Mindezek alapján tanulmányában a JRC egyértelműen kijelenti, hogy **az atomenergiának mindössze az uránérc bányászatának, feldolgozásának és dúsításának szakaszában van érzékelhető ÜHG-emissziója. Az atomerőmű üzemeltetési szakaszában az ÜHG-kibocsátás nullához közeli, így a nukleáris energia jelentősen hozzájárulhat az éghajlatváltozás mérsékléséhez**, ami a taxonómiarendelet egyik fontos környezeti célkitűzése.

## A villamosenergia-termelési technológiák összehasonlítása a vízigényeik alapján

Az édesvíz értékes erőforrás, amelynek felhasználását fenntartható módon kell kezelni. **Teljes életciklus alapon valamennyi villamosenergia-termelési eljárásnak van bizonyos mértékű vízfogyasztása (3. ábra).** Míg a vizet a legtöbb villamosenergia-termelési technológia az összes életciklusának szakaszában fogyasztja, addig a hőerőművek túlnyomó része azt főleg hűtővízként használja. Különösen igaz ez az atomerőművek esetén. (Az előbbi megállapítás alól kivételt képez a biomassza alapú villamosenergia-termelés, melyeknek a teljes életciklusra számított vízfogyasztása erősen függ az alapanyag előállításának vízigényétől). A nukleáris energia esetén az uránérc bányászata során számíthatunk jelentősebb vízfelhasználásra, azonban ennek mértéke is korlátozott. Ennek egyik oka az, hogy a bányászati és őrlési technológia kiválasztásánál gondosan mérlegelni kell, hogy az uránlelőhelyek többsége száraz, vízhiányos területeken található, ahol különösen fontos a rendelkezésre álló minimális vízkészlet megőrzése. Ettől függetlenül a bányászati szakasz vízfogyasztását erősen befolyásolja az alkalmazott technológia. Az *in-situ* kioldási (ISL) technológia alkalmazása során az uránt közvetlenül a lelőhelyen található kőzetből oldják ki megfelelő vegyszerek fúrólyukon keresztül a hordozó kőzetbe való injektálásával, míg egy másik fúrólyukon keresztül a felszínre hozzák az urántartalmú extraktumot. Ennek az eljárásnak nagyobb a vízigénye, mint más bányászati technológiáknak. Azonban ne feledkezzünk meg arról, hogy ebben az esetben nem keletkezik óriás tömegű bányameddő. 2019-ben a világ uránkitermelésének 57%-át *in-situ* kioldással végezték.




**3. ábra:** A villamosenergia-termelési technológiák összehasonlítása az üzemi vízfelhasználásuk szempontjából (JRC, Fig. 3.2-7.); Megjegyzés: a földgáznál a „CC" kombinált ciklusú gázerőművet, a „szén IGCC" a szén elgázosítását alkalmazó, kombinált ciklusú technológiát jelent.)

**A hőerőművi villamosenergia-termelési eljárások során a vízhasználat/-fogyasztás nagyságát jelentősen befolyásolja a választott hűtési technológia, és ez hatással van arra is, hogy a hűtővizet csak *használjuk*, vagy *el is fogyasztjuk*.**

A hűtővízellátás történhet frissvíz felhasználásával, melynek során a hűtőközegként használt folyó- vagy tengervíz csak egyszer áramlik keresztül a kondenzátoron. Ilyen hűtés van a jelenleg üzemelő paksi blokkoknál, melyek a Duna vizét használják végső hőnyelőként. E technológia sajátossága, hogy (1) a folyóból az atomerőmű hűtésére kivett vizet visszavezetik a folyóba, és (2) a visszavezetett hűtőközeg hőmérséklete nagyobb, mint a természetes víztesté, ami annak **hőterhelés**éhez vezet. Fontos azonban megemlíteni, hogy a felhasznált víz ez esetben nem fogy el, hanem kismértékben felmelegedve visszakerül a víztestbe. A vízveszteség mindössze a megemelt hőmérséklet miatt némiképp megnövekedett párolgásból fakad. A víztest frissvizes hűtés által okozott hőszennyezése kiküszöbölhető a **nedves hűtőtornyok** alkalmazásával, melyekben a kondenzátor hűtőközegét a toronyban kialakuló légáramlatba permetezik, így az ellenáramban vagy keresztirányban áramló levegő lehűti a vízcseppeket. E technológiák vízigénye (vízfogyasztása) azonban magasabb, mint a frissvízhűtésű eljárásé, mivel itt jelentős cseppelragadással, illetve párolgási veszteséggel kell számolni, és a hűtés fenntartásához az elpárolgott víz utánpótlása szükséges. Átmenetet képez a frissvizes és a nedves hűtőtornyos hűtés között a **hűtőtavas hűtés**. Ez egy olyan visszahűtéses rendszer, melynek lényege, hogy az egyszer már elhasznált hűtővizet nem engedjük el, hanem egy hűtőtóba vezetjük, ahol a víz konvekció és párolgás révén adja át a hőt a levegőnek. Ez esetben elsősorban párolgási veszteséggel kell számolnunk. Pakson, a régi és új blokkoknál egyaránt az egyik legkisebb vízigénnyel járó hűtési technológiát, a frissvízhűtést használjuk. Az egyes villamosenergia-termelő technológiák összevetése alapján összeségében a JRC megállapította, hogy **az atomerőművek vízigénye a konvencionális és biomassza-erőművekével összemérhető, frissvizes hűtés esetén alacsony, mértéke azonban nagyobb, mint a szélerőművek vagy a fotovoltaikus naperőművek vízigénye.**

## A villamosenergia-termelési technológiák összehasonlítása a vízi környezetre gyakorolt hatásaik alapján

Számos, a vizek kémiai szennyezésére és azok hatásainak jellemzésére szolgáló fenntarthatósági indikátorok közül a legelterjedtebben használtak a savasodási, az eutrofizációs, valamint az édes- és tengervízi ökotoxicitási potenciál. A JRC erre vonatkozóan is összevetette a különböző villamosenergia-termelési technológiák hatásait.

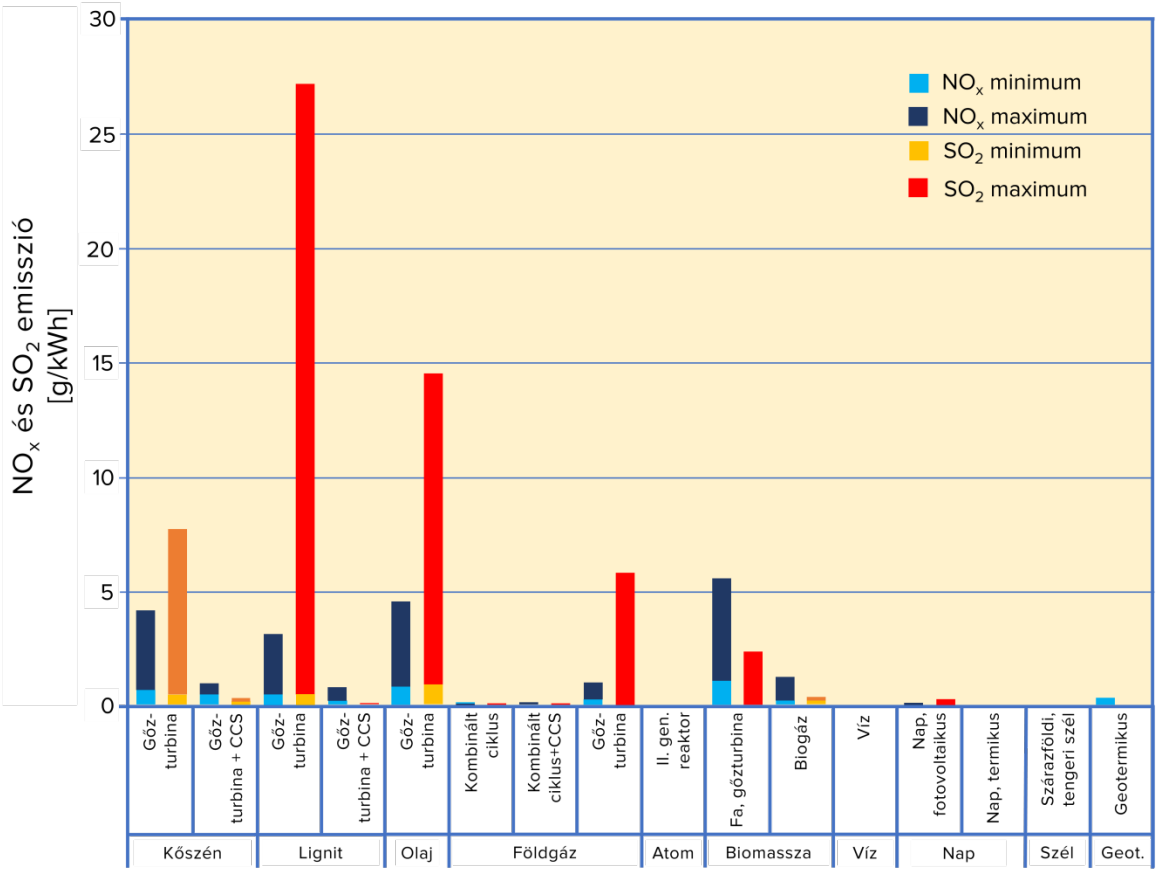
A **savasodási potenciál** egy adott technológia savasesők képződéséhez való hozzájárulásának mértékét fejezi ki – kén-dioxidra ($SO_2$) vonatkoztatva. Mivel a savasesők fő prekurzor vegyületei a nitrogén-oxidok ($NO_x$: NO és $NO_2$) és az $SO_2$, ezért ezek teljes életciklus alapján becsült kibocsátási értékeit célszerű összehasonlítani az egyes technológiák esetén. **A különböző hő- és villamosenergia-termelési technológiák életciklusára vonatkozó $NO_x$- és $SO_2$-emissziós adatok alapján a JRC tanulmányból kiderül (4. ábra), hogy a jelenlegi atomerőművi technológiák releváns kibocsátása nagyon alacsony, akárcsak a szél- és a vízenergiáé** szemben a fosszilis tüzelőanyag-technológiákéval, melyek közül a ligniterőművek $SO_2$-kibocsátása a legnagyobb (kb. 27 g/kWh). Ezeket követik a fűtőolajat felhasználó erőművek (kb. 15 g/kWh), míg a $NO_x$-kibocsátás a biomassza-erőműveknél a legmagasabb (kb. 6 g/kWh). De a kőszénnel és földgázzal működő erőművek $SO_2$-kibocsátása is jelentős a többi energiatermelő technológiához képest. Az atomenergiában az uránbányászat felelős a savasodási potenciál 82%-áért, míg a reaktorok (építés, üzemeltetés és leszerelés) a savasodási potenciál 8%-át teszik ki.

A felszíni vizek – különösen az állóvizek – szempontjából fontos paraméter egy adott termelési technológia eutrofizációhoz való hozzájárulásának mértéke, melyet az eutrofizációs potenciállal fejeznek ki. Az **eutrofizáció, más néven vízivirágzás** folyamán az állóvizekben olyan mértékben dúsulnak fel a növényi tápanyagok, melyek hatására a primer termelőszervezetek (pl. algák, hínárnövények) elszaporodnak. Ennek hatására oxigénhiányos állapot alakulhat ki a víztestben, ami a vízi élőlények pusztulásához, és toxikus anyagok keletkezéséhez vezethet. A villamosenergia-termelő technológiák közül az olaj- és széntüzelésű erőművek eutrofizációs potenciálja a legnagyobb (kb. 0,2–2,2 g $PO_4^{3-}$-ekv/kWh), míg **az atomenergiáé a legkisebb** (kb. 0,01 g $PO_4^{3-}$-ekv/kWh). **A szél- és a napenergia eutrofizációs potenciálja egy nagyságrendbe esik az atomenergiáéval**. Az atomenergiát mérlegre téve az eutrofizáció tekintetében: az uránbányászat 53%-kal, a dúsítás 17%-kal, a reaktor üzemeltetése 14%-kal és az újrafeldolgozás 11%-kal járul hozzá a nukleáris energia teljes eutrofizációs potenciáljához.

Az egyes technológiai eljárások vízi környezetre gyakorolt hatásainak vizsgálatánál fontos szerepet kap **a természetes víztestek hőterhelésének, hőszennyezésének elemzése**. A hőszennyezésre nemcsak az atomerőműveknél kell figyelni, hanem más hőtermelésen alapuló villamosenergia-termelési eljárásoknál is, ahol

természetes víztest bevonásával történik a hűtés. **A hűtővizet befogadó vizek hőszennyezettségét szigorúan ellenőrzik, s intézkedéseket hoznak a hőmérséklet-emelkedés elfogadható határokon belül történő fenntartása érdekében, hogy elkerüljék a vízi ökoszisztémák károsodását.** Ez hazánkban is így van. A hőmérsékleti korlátok megközelítése nem jelent nukleáris biztonsági kockázatot, és nagyon ritkán fordul elő, mivel a létesítmények tervezésénél nagyon extrém időjárási viszonyokat vesznek figyelembe, sőt ennek elkerülésére esetenként utóhűtőket is alkalmaznak, így van ez a Paks II. atomerőmű esetében is.

Összességében a JRC tanulmányában megállapítják, hogy **az összehasonlításban szereplő többi technológiához képest az atomenergia járul hozzá a legkevésbé a savasodáshoz. Az eutrofizáció tekintetében az atomenergia a többi technológiánál is jobban teljesít az édesvízi eutrofizáció szempontjából, a tengeri eutrofizáció tekintetében nem szignifikánsan, de rosszabbul teljesít. Az atomenergia édes- és tengervízi ökotoxikológiai mutatói is nagyon kecsegtetők.**

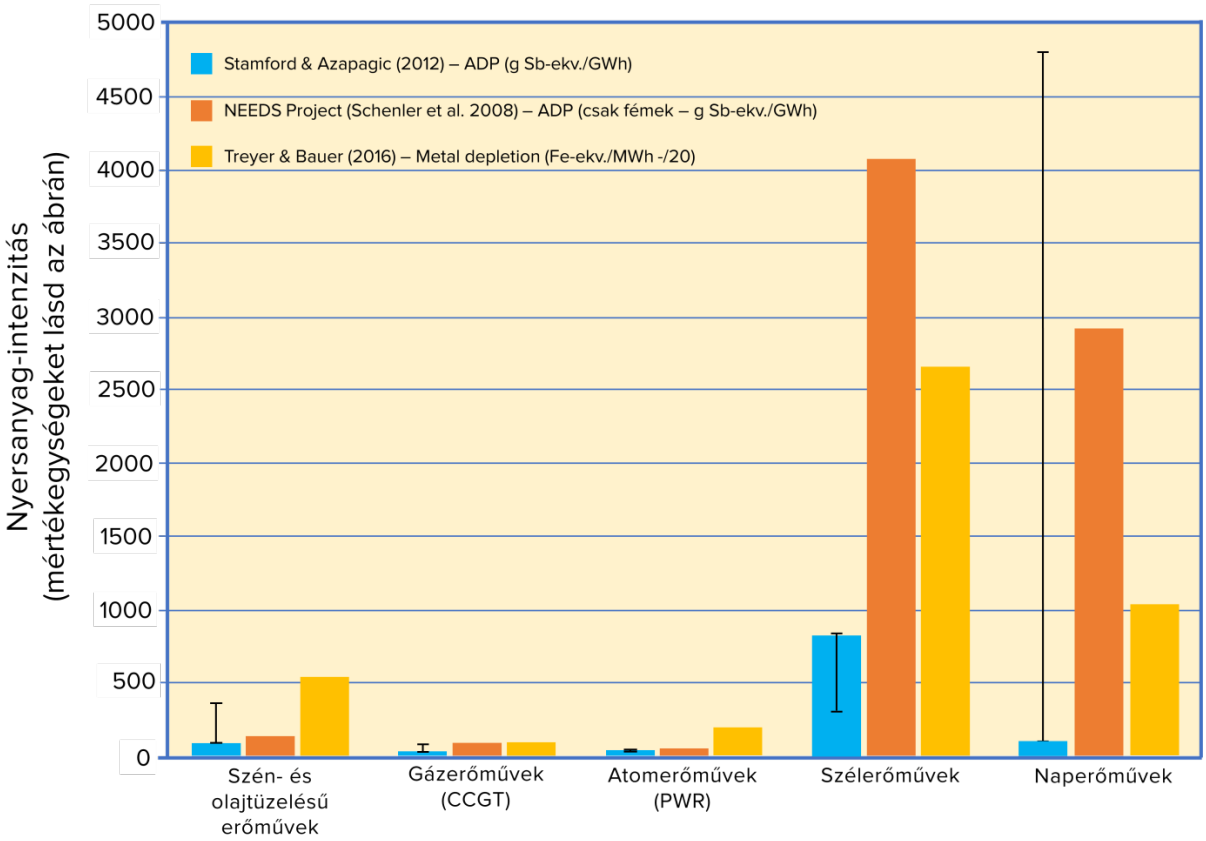



**4. ábra:** $NO_x$ és $SO_2$ kibocsátás a technológiák függvényében (JRC, Fig. 3.2-8. alapján)

## A villamosenergia-termelési technológiák összehasonlítása a természeti erőforrások igénybevétele szempontjából

A technológiák természeti erőforrás igénybevételeinek jellemzése a JRC tanulmányában az abiotikus (élettelen) kimerülési potenciállal (AKP) történik. Az alacsonyabb kimerülési potenciállal rendelkező technológiák preferáltabbak a fenntarthatóság szempontjából, ami azt jelenti, hogy **egységnyi villamos energia (egy kWh) megtermeléséhez kisebb mennyiségű nyersanyag-felhasználás kapcsolódik**.

A JRC értékelése szerint **az atomerőművek e téren is kiemelkedően teljesítenek**. Ennek elsődleges oka vélhetően az atomerőművek hosszú üzemideje (>60 év), valamint nagy teljesítménykihasználási tényezője (>90%). **A szél- és naperőművek fajlagos nyersanyagigénye az összes többi technológiához képest is nagy**, ugyanis élettartamuk ugyanis mindössze kb. 25 év, teljesítménykihasználási tényezőjük pedig napelemek esetén csak 10-20% között, szárazföldi szélerőművek esetén 15-35% között mozog, azonban tengeri szélfarmok esetén sem haladja meg rendszerint az 50%-ot.



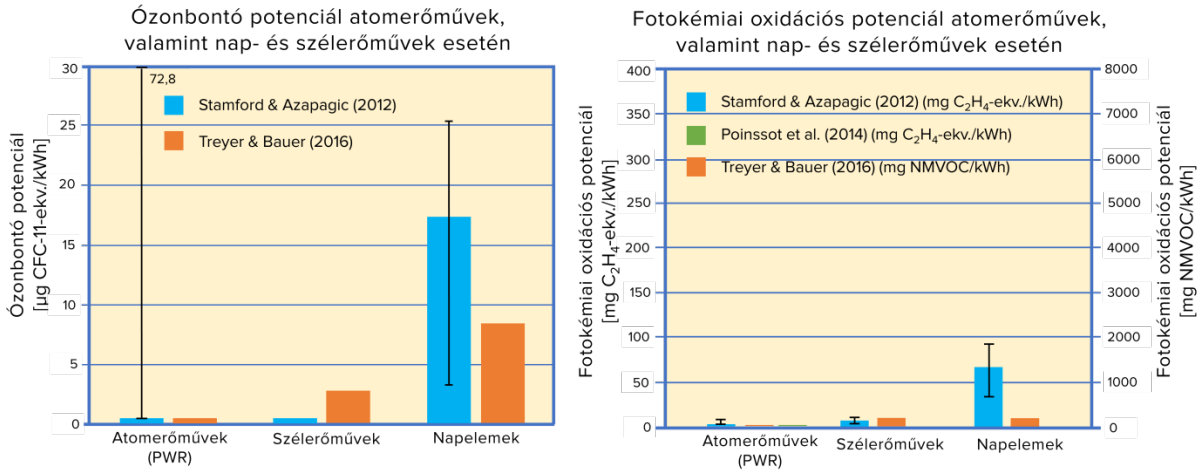

**5. ábra**: Egyes villamosenergia-termelési módok nyersanyag-intenzitása (JRC tanulmány, Fig. 3.2-12. alapján)

Fontos szempont, hogy egy adott technológiának milyen mértékű **<u>földterület-használata</u>** van. Ez alapján elmondható, hogy **egy MWh villamos energia megtermeléséhez <u>szárazföldi szélerőművek esetén kb. 8-szor, fotovoltaikus naperőművek esetén kb. 14-szer nagyobb földterület szükséges, mint amennyire atomerőművi villamosenergia-termelés esetén szükség van</u>.**

## A villamosenergia-termelési technológiák összevetése az ózonbontó és a fotokémiai oxidációs potenciáljaik szempontjából

Az Európai Bizottság tudományos háttérintézménye a villamosenergia-termelési technológiákat ózonbontó és fotokémiai potenciáljuk, továbbá szállópor-kibocsátásuk szempontjából is összehasonlította. A sztratoszférában található ózon (ózonpajzs) degradációját főleg a különböző halogénezett szénhidrogének okozzák. Az egyik legismertebb ilyen vegyület a CFC-11, fluor-triklórmetán, ismertebb nevén a Freon-11, amit korábban főként hűtőközegként használtak (hűtőkben). Ez az anyag ma már az **ózonbontó potenciál** referenciaanyaga. A másik fontos paraméter a **fotokémiai oxidációs potenciál**, mely közvetve azt jellemzi, hogy egy technológia milyen mértékben járul hozzá a fotokémiai szmog kialakulásához.

Az illékony szerves vegyületek (VOC-ok) és a szén-monoxid (CO) fotokémiai oxidációja során $NO_x$ vegyületek jelenlétében UV-fény hatására a troposzférában olyan vegyületek képződnek (pl. troposzferikus ózon, peroxi-acetilnitrát (PAN)), amelyek elősegítik a fotokémiai szmog kialakulását. **<u>A nukleáris energiatermelés mind az ózonbontó, mind pedig a fotokémiai oxidációs potenciál tekintetében az összes villamosenergia-termelő technológia közül a legjobban teljesít</u>, e téren környezeti teljesítményük a nap- és szélerőművekét is jócskán meghaladja.** A fosszilis erőművek azonban jelentősen hozzájárulnak az ózonbontó és fotokémiai szmog kialakulását elősegítő vegyületek kibocsátásához. Ezeknél az erőműveknél kell a legnagyobb szállópor- és illékony szervesanyag-kibocsátással is számolni.




**6. ábra**: Az atomerőművek, valamint a nap- és szélerőművek ózonbontó és fotokémiai oxidációs potenciálja (JRC tanulmány, Fig. 3.2-19. alapján)

**A Közös Kutatóközpont (JRC) által végzett tudományosan megalapozott elemzések eredményei alapján kimondható, hogy a nukleáris energiatermelés nem jár jelentősebb humán és környezeti kockázattal, mint más – a jelentésben megtalálható megújuló és nem megújuló villamosenergia-termelési technológiák.**

**A kutatóközpont ezzel megerősíti az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC), valamint a világ egyik leghíresebb műszaki egyeteme, az MIT véleményét, miszerint a tudományos kutatások eredményei alapján az atomerőművi villamosenergia-termelés környezeti és a teljes villamosenergia-rendszer szintjén értelmezett költségminimalizálás szempontjából előnyös.**