

INNOVÁCIÓ ÉS FENNTARTHATÓSÁG: AZ AI ÉS AZ EMBERI TÉNYEZŐ

STERCZL GÁBOR RÓBERT

DOI: 10.12700/PK.2026.269

Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar / evosoft Hungary Kft.
sterczl.gabor@evosoft.com

ABSZTRAKT

A fenntartható innováció egyre inkább nemcsak technológiai, hanem alapvetően emberi kérdésként jelenik meg a szakirodalomban: az emberi szükségletek, értékek és viselkedési minták döntően meghatározzák, hogy milyen innovációk születnek, melyeket fogad el a társadalom, és valóban hozzájárulnak-e a fenntarthatósági célokhoz. Ez a dolgozat arra a kérdésre keresi a választ: milyen mechanizmusokon keresztül formálják az emberi szükségletek és értékek a fenntartható innovációt, és hogyan jelenik meg ez a dinamika a mesterséges intelligencia energiafogyasztásának és a Green AI törekvések kontextusában. A vizsgálat szisztematikus irodomelemzésen alapul, elsősorban 2019–2026 közötti, peer-reviewed és preprint forrásokra támaszkodva, az ökológiai közgazdaságtan, az innovációkutatás, a szervezettudomány és az AI fenntarthatósági irodalom metszéspontján. Az elemzés három fő tematikus tengelyen halad: az emberi szükségletek és értékek innovációra gyakorolt hatásán, a szervezeti kultúra és a szabályozói környezet szerepén, valamint az AI energiafelhasználásának és a greenwashing kockázatának összefüggésein. Az eredmények azt mutatják, hogy az emberi dimenzió legalább három szinten hat a fenntartható innovációra: a fogyasztói és társadalmi értékek keresleti nyomásán, a szervezeti kultúrában beágyazott értékválasztásokon, valamint a szabályozói és pénzügyi környezeten keresztül. E három szint interakcióját a dolgozat Kína AI-fejlesztési pályáján keresztül is illusztrálja, rámutatva arra, hogy az állami szabályozás, a vállalati ESG ((Environmental, Social, Governance)-stratégiák és a fogyasztói elvárások egyszerre és részben ellentétes irányban formálják a fenntarthatósági eredményeket. Az AI energiafogyasztása e keretben új kritikus kihívásként jelenik meg, ahol az emberi döntések – modellválasztás, telepítési stratégia, transzparenciakövetelmények – közvetlenül befolyásolják a teljes rendszer ökológiai lábnyomát. A dolgozat rámutat a greenwashing kockázatára, a rebound-hatás problémájára és a mérhetőség hiányosságaira, és amellett érvel, hogy a valódi fenntartható AI-fejlesztés csak az etikai, társadalmi és környezeti értékek szisztematikus integrálásával valósítható meg. A kutatás korlátai közé tartozik a nyugati és kelet-ázsiai irodalom túlsúlya, valamint az, hogy a szisztematikus elemzés korrelációs összefüggéseket azonosít, ok-okozati kapcsolatok bizonyítása nélkül.

KULCSSZAVAK: *fenntartható innováció, emberi szükségletek, értékek, AI energiafogyasztás, fenntarthatósági átmenet*

BEVEZETŐ

A fenntarthatóság és az innováció kapcsolata az elmúlt évtizedekben gyökeresen átalakult. Míg korábban a technológiai megújulást a zöld szempontoktól független, önálló gazdasági hajtóerőnek tekintettük, ma egyre nyilvánvalóbbá válik, hogy az innováció már nem függetleníthető a társadalmi és ökológiai határok tiszteletben tartásától. Az éghajlatváltozás, a biodiverzitás csökkenése és az erőforrások túlhasználata olyan globális kihívásokat jelent, amelyek nemcsak a termelési rendszerek, hanem a mögöttük meghúzódó emberi értékek és döntési logikák újragondolását is szükségessé teszik. Ebben a kontextusban különösen fontos kérdéssé válik a mesterséges intelligencia (AI) szerepe. Az AI egyszerre jelenik meg a fenntartható fejlődés lehetséges katalizátoraként – hatékonyságnövelés, erőforrás-optimalizálás, új üzleti modellek révén – és új típusú környezeti teherként, hiszen a nagy nyelvi modellek betanítása és futtatása iparági léptékű energiafelhasználással jár. Ez a kettősség élesen rávilágít arra, hogy a technológia önmagában sem nem jó, sem nem rossz: hatása nagymértékben azon múlik, milyen emberi szükségletek, értékek és intézményi keretek irányítják a fejlesztési és alkalmazási döntéseket.

Munkám vezérkérdése: Milyen mechanizmusokon keresztül formálják az emberi szükségletek és értékek a fenntartható innovációt, és hogyan jelenik meg ez a dinamika az AI energiafogyasztásának és a Green AI törekvések összefüggésében.

A fenntartható innováció lényege, hogy az új technológiák és üzleti modellek egyszerre vegyék figyelembe a környezeti, társadalmi és gazdasági szempontokat és ne csak a rövid távú előnyöket és profitot tartsák szem előtt. Az emberi szükségletek és értékrend alapvetően meghatározzák, milyen innovációk születnek meg, melyeket fogadja el a társadalom, és milyen irányba tolódik el a technológiai fejlődés – ez napjainkban világosan megfigyelhető olyan technológiáknál, mint az elektromos járművek vagy az AI.

A vizsgálat szisztematikus irodalomelemzésen alapul, amely az ökológiai közgazdaságtan, az innovációmenedzsment, a fenntarthatóság-tudomány és az AI-fenntarthatóság területein releváns, elsősorban 2019–2026 közötti szakirodalmát dolgozza fel. A forráskiválasztás szempontjai: (1) peer-reviewed folyóiratcikkek és konferenciaanyagok, kiegészítve elfogadott, szaklektorált preprint forrásokkal; (2) tematikus relevancia a fenntartható innováció emberi dimenziójával és az AI energiafogyasztásával kapcsolatban; (3) az eredmények empirikus megalapozottsága vagy elméleti hozzájárulás mértéke.

1. A FENNTARTHATÓSÁG FOGALMA ÉS GLOBÁLIS KIHÍVÁSOK

Az ENSZ Környezet és Fejlődés Világbizottságnak (Brundtland-bizottság) 1987-ben közzétett Közös jövőnk című jelentése először mutatta be nemzetközileg a fenntartható fejlődés koncepcióját (WCED 1987). A gazdasági növekedés új korszakát tűzte ki céljául, egy olyan növekedést, mely erőteljes, de társadalmilag és környezetileg is fenntartható. Megalkották a fenntartható fejlődés klasszikus meghatározását, mely szerint a jelen szükségleteinek kielégítését úgy kell biztosítani, hogy az ne veszélyeztesse a jövő generációk esélyét saját szükségleteik kielégítésére. (Gonda, 2022) Az emberi tevékenység eredménye – különös tekintettel az éghajlatváltozásra – azonban az ökológiai funkciók gyors és érzékelhető romlását idézték elő, ami azonnali beavatkozást és a kibocsátás jelentős csökkentését igényli a jövő generációinak védelme érdekében.

A jelenlegi globális kihívások közé tartozik az éghajlatváltozás, a biodiverzitás csökkenése, a talaj- és vízszennyezés, a társadalmi egyenlőtlenségek növekedése és az erőforrások túlhasználata, amelyek együttesen kényszerítik ki az innovációk „fenntarthatóbb” irányba fordítását (Oksanen & Hautamäki, 2015; Diepenmaat et al., 2020). Az innováció egyszerre eszköze és okozója a fenntarthatósági válságoknak (Semenova et al., 2024). A technológiai fejlődés hosszú ideig elsősorban javította az emberi életminőséget (pl. a várható élettartam növekedése, a nehéz fizikai munka csökkenése révén), ugyanakkor az első ipari forradalom óta megjelenő innovációk jelentős része súlyos környezeti terheket és károkat (például talajkimerülést, lég- és vízszennyezést) okozott. Ez a kettősség a népesség drasztikus növekedésével és a megnőtt életszínvonallal, illetve fogyasztással kiegészülve napjainkra egyfajta tetőponthoz közelít.

„A fenntartható innováció” olyan technológiai, szervezeti vagy társadalmi újítást jelent, amely tudatosan integrálja a környezeti, társadalmi és gazdasági célokat, nemcsak a versenyképességre, hanem az emberek jóllétére és a bolygó állapotára is fókuszálva. A szakirodalom szerint ez a fajta innováció nem egy statikus állapot, hanem egy olyan folyamatosan alakuló folyamat, amelyben az erőforrás-felhasználást, a beruházásokat, a technológiai irányokat és az intézményi kereteket a jelen és a jövő generációk szükségleteihez kell igazítani (Oksanen & Hautamäki, 2015; Kratzer et al., 2021).

Ahogy Kratzerék kutatási is rámutatnak, hogy a fenntartható innováció emberi oldala három fő tényező köré szervezhető:

- az emberi értékek,
- a szervezeti kultúra,
- a szereplők fenntartható viselkedése.

Az értékek határozzák meg, hogy egy szervezet milyen típusú innovációba fektet, milyen kockázatokat tart elfogadhatónak, és mennyire veszi komolyan a társadalmi és környezeti hatásokat (Kratzer et al., 2021).

Az ökológiai közgazdaságtan különbséget tesz gyenge és erős fenntarthatóság között. A kettő közötti különbség a természeti és a mesterséges tőke közötti viszony alapján jellemezhető. A gyenge fenntarthatóság a természeti és a mesterséges tőkét alapvetően egymással helyettesíthetőként értelmezi. Az erős fenntarthatóság ezzel szemben a természeti tőke elsőbbségét hirdeti, és mesterséges tőkével korlátozottan vagy nem pótolható erőforrásként azonosítja (Málovics & Bajmócy, 2009). Ha a tóban nincs hal, akkor ott a leginnovatívabb felszereléssel sem tudnak a halászok halat fogni, tehát a természeti tőke korlátozza a növekedést. Az erős és gyenge fenntarthatóság tehát fontos szempont, amelyet figyelembe kell venni, amikor a környezeti szempontú innovációkat vizsgáljuk (Haskell et al., 2021). Fontos, hogy különbséget tudjunk tenni a fenntartható és a környezeti innováció között.

A fenntartható innováció tágabb fogalom, több területet fed le. Egyik részterülete csak a környezet, a környezeti innováció, melynek pontos meghatározására többféle megközelítés is létezik. A kapcsolódó szakirodalom (Angelo et al., 2012) ezzel kapcsolatban általában három fő fogalmat emel ki:

- környezetvédelmi innováció,
- zöld innováció és
- ökoinnováció.

Az 1970-es években a környezeti innovációt javarészt a környezetszennyezés megelőzésével kötötték össze, majd később a vállalatok felismerték a benne rejlő termeléssel kapcsolatos hatékonyságnövelési lehetőségeket. Az ezt követő évtizedekben a környezeti innováció egyre inkább a szervezetek nagyobb környezeti elkötelezettségével kapcsolódott össze (Angelo et al., 2012). A környezeti innovációk többsége inkrementális (fokozatos) jellegű. Bár a szakirodalom és a gyakorlat egyaránt a rendszerszintű megoldásokat részesíti előnyben az elkülönült innovációkkal szemben, a fejlesztések többsége alapvetően a meglévő társadalmi-technológiai rendszerek környezeti teljesítményének finomhangolását célozzák. Ezek az új, környezetbarát megoldások gyakran pontosan ugyanazt a funkcionális minőséget nyújtják, mint a hagyományos technológiák, jellemzően a zöld technológia magasabb bekerülési költségei miatt azonban többnyire csak magasabb áron érhetők el. Ez még inkább magyarázza a környezeti innovációk és átvételük támogatáspolitikai-indukált jellegét (Angelo et al., 2012).

Az Európai Unióban az utóbbi években tapasztalható fokozott környezetpolitikai szigorot olyan aggodalmak kísérik, hogy az a gazdasági versenyképesség és a jólét rovására mehet. Az úgynevezett Porter-hipotézis (<https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.9.4.97>) ennek ellenkezőjét állítja, miszerint a környezeti politika szigorúsága nem rontja a versenyképességet, hanem a megnövekedett innovációs aktivitás és a termelékenység javulása révén a cégek javára válik. Ez azt jelenti, hogy az innováció révén a környezeti szabályozásból származó közvetett hasznok ellensúlyozzák a cégek ugyanazon szabályozás által keletkeztetett közvetlen többletköltségét. Ez alapján a környezeti politika szigorának növekedése arra készteti a cégeket, hogy több környezetvédelmi innovációt hajtsanak végre, viszont kutatások is megerősítik, hogy ez a hatás általában véve csekély, és a különböző szabályozási eszközök esetében hasonló mértékű (Galeotti et al., 2020).

A külső szabályozók és gazdasági ösztönzők korlátozott sikere arra mutat rá, hogy a technológiai és strukturális átmenet nem valósítható meg pusztán piaci kényszerítéssel. Valódi és rendszerszintű fenntarthatóság csak akkor érhető el, ha a technológiai fejlesztések mögött álló motivációkat alapjaiban gondoljuk újra. Ezért az innováció irányának kijelölésekor a fókusz egyre inkább a mélyebben gyökerező emberi tényezők felé tolódik el, szükségessé téve az emberi igények és értékek újraértelmezését a fenntarthatóság szempontjából:

- Alapvető értékek: Az etika, a méltóság, az inkluzivitás, a társadalmi igazságosság, az autonómia, a bizalom és a cselekvőképesség a fenntartható innováció alapját képezik. Ezek az értékek biztosítják, hogy a technológiai fejlődés az emberi jólétet és a bolygó integritását szolgálja (Pagani, 2025; Mgpl & Mandaleeka, 2025).
- Emberközpontú megközelítések: Hangsúlyozzák az empátiát, a kreativitást és az etikai ítélőképességet, kiegészítve a mesterséges intelligencia képességeit a társadalmilag felelős és környezetileg fenntartható megoldások előmozdítása érdekében (Pagani, 2025; Maharani, 2025).
- Irányítási elvek: Az emberséget, identitást, befogadást, bizalmat és cselekvőképességet magukban foglaló etikai keretrendszerek irányítják az innovációt, biztosítva az emberi jogok és az ökológiai határok tiszteletben tartását (Mgpl & Mandaleeka, 2025).

2. AZ INNOVÁCIÓ EMBERI DIMENZIÓ: SZÜKSÉGLETEK, ÉRTÉKEK, VISELKEDÉS

Az innováció alapvető hajtóereje az emberi szükségletek kielégítése: kényelem, egészség, mobilitás, biztonság, társadalmi státusz, identitás stb. A fenntarthatósági fordulat akkor reális, ha ezek a szükségletek úgy fogalmazódnak újra, hogy nem kizárólag fogyasztásnövekedésen, hanem minőségi, alacsonyabb erőforrás-igényű megoldásokon keresztül teljesüljenek, pl. autótulajdon helyett mobilitási szolgáltatások, anyagi javak helyett élmények (Kratzer et al., 2021; Semenova et al., 2024).

A "zöld" fogyasztói értékek növekedését jól mutatják a megújuló energiaforrások és környezetbarát termékek iránti kereslet alakulásáról szóló felmérések. Indiában a válaszadók többsége pozitívan viszonyul az öt fő megújuló energiaforráshoz (nap-, szél-, víz-, geotermikus és biomassza), ami kedvező terepet teremt az ökoinnovációk számára (Rutkowska et al., 2021). Hasonló felmérések Magyarországon is történtek. Magyarországon a környezetbarát/fenntartható termékek iránti kereslet láthatóan nő, a környezetvédelemhez általában pozitívan viszonyulnak, de erős az "attitűd–viselkedés" rés. Bár sokan fontosnak tartják a fenntarthatóságot, de vásárláskor továbbra is erősen árérzékenyek az emberek (Bethlendi & Póra, 2021; Mónus et al., 2022). A szektoronkénti kutatások inkább irányvonalakat, mintsem pontos idősorokat mutatnak be, azonban általános tendenciaként megfigyelhető, hogy a fiatalabb, képzettebb fogyasztói csoportokban kifejezetten erősödik az érdeklődés az etikus és hazai termékek iránt (Szűcs, 2025; Bethlendi & Póra, 2021; Mónus et al., 2022). Ez is jelzi, hogy a társadalmi értékváltás konkrét piaci lehetőségeket nyit a fenntartható technológiák számára (Rutkowska et al., 2021).

Az etikai, társadalmi és környezeti értékek szisztematikus beépítése az innovációs folyamatba – például az értékérzékeny tervezés vagy a felelősségteljes innovációs megközelítések révén – segít kezelni az értékkonfliktusokat (pl. az adathasznosítás és a magánszféra védelme, vagy a hatékonyság és a munkahelyek megtartása között). Az ilyen keretek azt vizsgálják, hogy a szervezetek mennyire képesek "magukévá tenni" a társadalmi értékekből fakadó elvárásokat, és azokra innovációval reagálni (*value-sensitive innovative absorptive capacity*) (Bednar & Spiekermann, 2020; Garst et al., 2022). A humán értékek fenntartható jövő szempontjából fontos csoportját alkotják az igazságosság, felelősség, együttműködés, mértékletesség és a természettel való kapcsolat erősítése. A szakirodalom szerint ezek a tartós értékek nem pusztán mesterségesen alkotott viselkedési szabályok vagy társadalmi konvenciók, hanem a közös emberi örökség részei, amelyek aktualizálhatók a mai fenntarthatósági kihívásokra válaszul (Huba, 2022).

Újabb kutatások arra hívják fel a figyelmet, hogy a fenntarthatóság felé vezető útnak szükségszerűen egy emberközpontú szemléleten kell alapulnia, és a bolygó iránti empátiát is meg kell tanulni, például részvételi ökológiai történetmesélésen keresztül. A tervezési folyamatban nemcsak az emberek, hanem az emberen túli szereplők (ökoszisztémák, fajok), valamint a jövő generációk érdekeit is igyekeznek megjeleníteni, ami visszahat az innovációk formájára (Talgorn & Ullerup, 2023).

2.1 Ember az innováció fókuszában

A szervezetek emberi erőforrás- és értékmenedzsmentje kulcsfontosságú a fenntartható innováció szempontjából: a stratégiai és fenntartható emberközpontú menedzsment ötvözése egyszerre javíthatja a versenyképességet és a hosszú távú társadalmi-környezeti teljesítményt. A fenntartható emberközpontú vezetés hangsúlyt fektet az etikus gyakorlatokra, a több érintett bevonására, és a munkavállalók jóllétére, ami termékeny talajt biztosít az értékalapú innovációkhoz (Gunawan & Mikhail, 2025). Kutatások rámutatnak, hogy a vállalati kultúrában beágyazott fenntarthatósági értékek – például a "*sustainable innovational values*" modellben (Kratzer et al., 2021) – motiválhatják és energizálhatják a felhasználó-innovátorokat és vállalkozókat, ami közvetlenül támogatja a fenntartható innovációs stratégiákat. A szervezeti vezetés, az oktatás és közintézmények esetében, szintén kulcsszereplő a fenntarthatóság és innováció kultúrájának kiépítésében (Doulami & Dimitriou, 2026; Diepenmaat et al., 2020).

A fenntartható fejlődéshez nemcsak technológiai, hanem társadalmi innovációra is szükség van: új együttműködési formákra, üzleti modellekre, finanszírozási megoldásokra és intézményi keretekre. Az agrár-élelmiszer rendszer átalakítását vizsgáló kutatások például azt mutatják, hogy a társadalmi innováció (pl. rövid ellátási láncok, közösségi mezőgazdaság) nélkül a technológiai fejlesztések sem vezetnek valódi fenntartható áttöréshez (Diepenmaat et al., 2020). A fenntartható fejlődési átmenet egyben értékvtáltást is igényel: a fogyasztás diverzitásának növelése helyett az ökológiai terhelés csökkentése, a rövid távú profit helyett a többdimenziós értékteremtés kerül előtérbe. Ez a szemléletmód az innovációs oktatásban is megjelenik, ahol a mérnöki gondolkodás alapértékeinek újradefiniálását sürgetik (Diepenmaat et al., 2020; Semenova et al., 2024). Az eddigiekben áttekintett fogyasztói, szervezeti és intézményi tényezők azonban egy sajátos technológiai kihívással is szembesülnek: a mesterséges intelligencia egyre növekvő energiaigénye és ökológiai lábnyoma önmagában is az emberi értékvtálasztások próbakövévé válik – mind a fejlesztők, mind a felhasználók, mind a szabályozók számára.

3. AI ENERGIAFOGYASZTÁS ÉS "GREEN AI"

Az AI energiafogyasztása ma már nagyságrendileg iparági szintű környezeti problémává vált, a Green AI pedig ezt próbálja energia- és karbonhatékony technikákkal kezelni – ugyanakkor a fenntarthatósági kommunikációban egyre nagyobb a greenwashing kockázata. Sok vállalat zöldnek állítja be az AI-megoldásait anélkül, hogy ezek ténylegesen jelentős, mérhető kibocsátáscsökkentést hoznának a teljes rendszer szintjén. A nagy mesterségesintelligencia-modellek képzése és futtatása jelentős energiaigénnyel jár, ami új típusú klímakockázati kategóriaként jelenik meg. Életciklus-elemzések szerint egy nagy nyelvi modell (pl. GPT-3) egyszeri betanítása több mint 1200 MWh villamos energiát igényelhet, és több száz tonna széndioxid-egyenérték kibocsátásával járhat. Egyes csúscategóriás modellek tréningjének szénlábnyoma több ezer tonna CO₂-egyenérték, az AlexNet szintű modellek 0,01 tonnás tartományától a LLaMA 3.1 méretű modellek akár 8 900 tonnájáig (Kim et al., 2026; Luccioni & Hernandez-Garcia, 2023; Dorsey et al., 2025). Az azóta eltelt időszakban megjelenő újabb és nagyobb teljesítményű modellek esetében ez a szám ennek sokszorosát teheti ki (Laaroussi et al., 2025; Kausar et al., 2025; Desroches et al., 2025). Egy átfogó áttekintés szerint a gépi tanulás szénlábnyomát számos tényező befolyásolja: a modell mérete, a tanítás időtartama, az adatközpont energiahatékonyasága, az áramtermelés szénintenzitása, valamint az inferencia (lekérdezések futtatása) kumulatív terhelése.

A legújabb tanulmányok rámutatnak, hogy bár a kutatások fókuszja sokáig a tréning- és tanítási módszerekre korlátozódott, a tömeges felhasználás során az inferencia – vállalati és fogyasztói oldali – energiaigénye is kritikus a teljes környezeti hatás szempontjából (Trinci et al., 2024; Kim et al., 2026; Luccioni & Hernandez-Garcia, 2023).

A Green AI irányzat célja, hogy az algoritmusokat, az infrastruktúrát és a működtetést úgy alakítsa, hogy az energiafelhasználás és a szénlábnym az adott teljesítményszint mellett minél kisebb legyen. Ennek tipikus technikái a modellkompresszió (*pruning*, *kvantizáció*, *knowledge distillation*), a hatékonyabb architektúrák keresése, a hardverre szabott tervezés, a kisebb modellek előnyben részesítése, illetve a futtatás alacsony szénintenzitású időszakokban és régiókban. Empirikus vizsgálatok szerint egyes kompressziós és architektúra-optimalizálási technikák jelentős energia-megtakarítást eredményezhetnek hasonló pontosság mellett, feladattól és modelleszaládtól függően. Emellett megjelennek mérési és transzparencia-eszközök: például a *CodeCarbon*-t használó energiatudatos (*energy-aware*) keretrendszerek, amelyek modelljeik tréningje közben valós időben mérik az energia- és CO₂-kibocsátást, illetve kijelzőn mutatják az energia-pontosság kompromisszumokat. Számos friss kutatás az energiahatékony erőforrás-kezelésre, virtualizációra és hűtésre koncentrál (pl. folyadékűtés, VM-elhelyezési algoritmusok, energiatakarékos ütemezés); ezekkel 7–30%-os megtakarítás érhető el a hagyományos megoldásokhoz képest (Udatha & Lakshmeeswari, 2024; Zeng & Wu, 2024). Empirikus vizsgálatok szerint már az algoritmus vagy a tanítási stratégia megváltoztatása is akár 100-szoros különbséget eredményezhet az energiafogyasztásban hasonló pontosság mellett (Verdecchia et al., 2022; Yarally et al., 2023). Egyes tanulmányok jó gyakorlatokat azonosítanak: hatékonyabb hardverek használata, futtatás alacsony szénintenzitású régiókban, hiperparaméter-keresés optimalizálása, modellméret csökkentése, kvantizáció, valamint az inferencia energiaigényének mérséklése intelligens ütemezési és önadaptív keretrendszerekkel. Szórványos ipari adatok alapján például egy nagy felhőszolgáltató esetében az ilyen jó gyakorlatok révén az ML-tréning energiaigénye a teljes vállalati energiafelhasználás 15%-a alatt maradhat, miközben az abszolút energia- és kibocsátásértékek így is növekednek a gyors terjedés miatt (Tedla et al., 2024; Patterson et al., 2022; Yang et al., 2023). Más munkák a Small is Sufficient elv alapján azt mutatják be, hogy feladat-specifikus, kisebb modellek választásával globálisan is több tíz TWh megtakarítás lenne elérhető, ha nem mindig a legnagyobb modellt futtatnánk (Barros et al., 2025). A fenntartható AI egyik kulcskérdése a mérés: hogyan lehet egységesen és transzparensen nyomon követni az egyes modellek energia- és karbonlábnymát. Nyílt forráskódú eszközök, mint az Eco2AI, kifejezetten azt célozzák, hogy a kutatók és fejlesztők automatikusan rögzítsék a modellek energiafogyasztását és a hozzá tartozó CO₂-kibocsátást, ezzel ösztönözve a még inkább energiahatékony architektúrák keresését (Budennyy et al., 2022; Luccioni & Hernandez-Garcia, 2023). Újabb javaslatok a Sustainability Model Cards koncepciót vetik fel, amely a meglévő modelldokumentációs kezdeményezéseket – például a Model Cards megközelítést – bővítené energia- és fenntarthatósági metrikákkal, egy formális minőségmodellhez kapcsolva. Más kutatások a teljes AI-rendszer – tranzakciók, felhasználási minták, elosztott inferencia – régióérzékeny, életciklus-alapú szénszámítását javasolják, kombinálva AI-specifikus kockázati keretrendszerekkel (Jouneaux & Cabot, 2025; Kausar et al., 2025; Kim et al., 2026).

3.1 Hol jön be a greenwashing

A greenwashing általánosságban azt jelenti, hogy egy vállalat a valósánál zöldebbnek mutatja magát – félrevezető, túlzó vagy nem ellenőrizhető fenntarthatósági állításokkal.

Pénzügyi és ESG-kutatások szerint sok cég fenntarthatósági jelentése kozmetikázott, azaz a kommunikált karbon- és ESG-eredmények nem mindig tükrözik a tényleges kockázatokat és kibocsátásokat. Kísérleti vizsgálatok azt mutatják, hogy még a szakmai beszerzések döntéshozói is nehezen különböztetik meg a zöldre mosott termékeket a valóban tanúsítottan fenntarthatóktól – a fizetési hajlandóságuk alig különbözik a két kategória között (Siddique et al., 2026).

Az AI vonatkozásában több helyen is megjelenik a greenwashing jelensége:

- Ha egy vállalat azt kommunikálja, hogy az "AI-ja zöld", csak azért, mert valamelyik komponens hatékonyabb, miközben a skálázás és a keresletnövekedés miatt a teljes rendszer energiafogyasztása és kibocsátása összességében tovább nő (rebound-hatás / Jevons-paradoxon) (Mhlanga, 2025; Luccioni et al., 2025).
- Ha karbonsemleges AI-t ígér, de ez döntően offsetekre (kibocsátás-ellentételezésre) épül, miközben a saját infrastruktúrája vagy modelljei érdemben nem lettek hatékonyabbak (Siddique et al., 2026).
- Ha csak relatív mutatókat kommunikál (pl. "X%-kal hatékonyabb"), így nehezen ítéltethető meg, hogy a skálázás miatt összességében nő-e vagy csökken a környezeti lábnyom (Siddique et al., 2026).

A greenwashing nemcsak kommunikációs probléma: félrevezeti a fogyasztói döntéseket, gyengíti a szervezetek valódi fenntarthatósági elköteleződését, és megnehezíti a szabályozók számára annak felismerését, hogy mely innovációk valóban fenntarthatók. A fogyasztói értékelés félrevezethető, a szervezeti kultúra fenntarthatósági narratívák mögé bújhat, a szabályozói keret pedig csak lassan képes lépést tartani a technológiai fejlődéssel. Mindez egy konkrét, nagyszabású összefüggésrendszerben is vizsgálható – a következő fejezet Kína esetén keresztül mutatja meg, hogyan hat egymásra a három szint egy feltörekvő AI-nagyhatalom kontextusában.

4. KÍNA, MINT ESETTANULMÁNY: AZ EMBERI DIMENZIÓ HÁROM SZINTJE

A megelőző fejezetekben azonosított három szint – fogyasztói értékek, szervezeti kultúra és szabályozói környezet – nem elvont kategóriák, hanem konkrét geopolitikai és gazdasági kontextusban hatnak egymásra. Kína esete erre különösen szemléletes példát kínál: egy olyan ország, ahol az állami szabályozás (harmadik szint), a vállalati ESG-stratégiák (második szint) és a gyorsan változó fogyasztói-befektetői elvárások (első szint) egyidejűleg, egymással részben ellentétes irányban formálják az AI-fejlesztés fenntarthatósági pályáját. Az alábbi áttekintés nem törekedett teljességre, hanem illusztrációként szolgál arra, hogy a három szint interakciója hogyan teremthet egyszerre lehetőséget és feszültséget a fenntartható AI-innováció számára.

Kína az egyik legnagyobb adatközpont- és AI-nagyhatalom, ahol a kormányzati politikák egyszerre ösztönzik a mesterséges intelligencia fejlesztését és a digitális infrastruktúra energiahatékonyságának javítását.

A szakirodalom rámutat, hogy a gyors AI-adoptálás nagy energiaigényt és kapcsolódó kibocsátásokat generál, ugyanakkor az elektromos hálózat dekarbonizációja és a zöld adatközpontok terjedése középtávon érdemben csökkenthetik az AI fölösleges kibocsátását (Desroches et al., 2025). Kínában és más feltörekvő piacokon az ESG iránti befektetői érdeklődés növekedése ösztönzi a vállalatokat a környezeti és társadalmi teljesítményük fejlesztésére, beleértve az energiateljesítmény digitális technológiáit is. Empirikus vizsgálatok szerint a jobb ESG-teljesítmény általában együtt jár a jobb pénzügyi mutatókkal és alacsonyabb kockázattal, ami visszacsatolásként megerősíti a fenntarthatóbb üzleti és technológiai gyakorlatokat (Ding et al., 2024; Athari et al., 2024; Tyan et al., 2024). A nagy kínai AI-modellek – nyelvi, látásalapú és multimodális modellek – tipikusan nagy, gyakran szénintenzív hálózatra csatlakozó adatközpontokban futnak; tényleges lábnyomukat a központok energiahatékonysága és az adott tartomány villamosenergia-mixe határozza meg (Li et al., 2023). A zöld adatközpont-politikák ellenére a felhasználás robbanásszerű növekedése – az AI-szolgáltatások ágazatokon átívelő terjedése miatt – az energiahatékonyság javulása mellett is növelheti az abszolút kibocsátást. Ezt igazolják a zöld növekedést és karbonsemlegességet vizsgáló kvantilis panelregressziós modellek is a legnagyobb kibocsátó országok, köztük Kína, az USA és India esetében. A kutatások ezért egyre nagyobb figyelmet fordítanak a hibrid *edge-cloud* és *on-device* AI-megoldásokra. Ezek lényege, hogy a kisebb számítási igényű vagy ismétlődő feladatokat helyben futó, kisebb vagy kvantizált modellek kezelhetik, míg a komplexebb lekérdezések felhőben futó nagyobb modellekhez kerülnek. A modellválasztási és routing-megközelítések – például a FrugalGPT és a RouteLLM – elsősorban költség- és teljesítményoptimalizálási keretként jelentek meg, de logikájuk fenntarthatósági szempontból is releváns, mivel elkerülhetővé tehetik, hogy minden kérés automatikusan a legnagyobb modellhez kerüljön (Chen et al., 2023; Ong et al., 2025). Ugyanakkor a lokális és felhőalapú futtatás környezeti mérlege nem általánosítható: függ a hardvertől, a modellmérettől, a kvantizációtól, a használati mintázattól, valamint az energiaforrás szénintenzitásától. Ezért a lokális kis modellek – például TinyLLaMA-, Gemma-, LLaMA- vagy Qwen-alapú futtatások – csak bizonyos feladatok és használati profilok mellett jelenthetnek valódi energia- vagy hálózati terheléscsökkentést; az állítás empirikus mérést igényel (Barros et al., 2025; Vashishth et al., 2025). A lokális modellek gyors fejlődése ugyanakkor jelzi, hogy a felhőalapú nagy modellek és az eszközön futó kisebb modellek közötti munkamegosztás a következő években egyre fontosabb fenntarthatósági kérdéssé válhat.

Ipari környezetben egy hierarchikus, részben lokálisan futó, CNN-alapú – azaz konvolúciós neurális hálózatra épülő – hibadiagnosztikai rendszer közel 56%-kal csökkentette az energiafogyasztást egy folyamatosan nagy modellt futtató referenciarendszerhez képest, hasonló pontosság mellett (Vashishth et al., 2025).

Egy tanulmány azt becsüli, hogy ha a világszerte futtatott AI-feladatok jelentős részét megfelelően választott kisebb modellekre szerveznék át, a globális AI-energiaigény érdemben (nagyságrendileg TWh-ban mérhetően) csökkenthető lenne, miközben a funkcionalitás nagy része megmarad (Barros et al., 2025).

A pozitív eredmények ellenére fenntarthatósági szempontból a lokális modellek és a nagy, globális adatközpontok közti választás nem fekete-fehér, hanem kontextusfüggő. Összességében a kínai eset jól mutatja, hogy sem a szabályozói akarat, sem a technológiai kapacitás önmagában nem elégséges a valódi fenntarthatósági fordulat eléréséhez: az emberi dimenzió mindhárom szintjének – a fogyasztói értékértékelésnek, a szervezeti kultúrának és a szabályozói keretnek – koherens irányba kell mutatnia, hogy szinergikus hatást érjenek el.

Ahol ez nem teljesül, ott a hatékonyságnövelés és az összkibocsátás növekedése párhuzamosan zajlik – ez az ellentmondás a rebound-hatás (azaz, amikor egy hatékonyabb megoldás miatt a használat nő, és ezzel részben vagy teljesen elvész a megtakarítás) egy konkrét, nagyszabású megnyilvánulása.

5. AZ EMBERI DIMENZIÓ SZINTÉZISE A FENNTARTHATÓ INNOVÁCIÓBAN

A dolgozatban áttekintett szakirodalom alapján az emberi dimenzió és a fenntartható innováció kapcsolata nem egyirányú folyamat, hanem egy többszintű, egymásra kölcsönösen visszaható rendszer. A következőkben e rendszer három analitikus szintjét azonosítom, majd kritikusan értékelem azokat a feszültségpontokat, amelyekre a szakirodalom eddig nem nyújtott kielégítő választ.

5.1 Az emberi dimenzió három szintje

Az irodalomelemzés alapján az emberi szükségletek és értékek legalább három jól elkülöníthető szinten formálják a fenntartható innovációt, és e szintek egymást erősítve vagy éppen gyengítve hatnak.

Az első, fogyasztói-társadalmi szinten a változó értékpreferenciák – klímatudatosság, méltányosság iránti igény, egészséges életkörnyezet – keresleti nyomást gyakorolnak az innovációs irányokra. A magyarországi és indiai felmérések (Bethlendi & Póra, 2021; Rutkowska et al., 2021) azonban rámutatnak arra a kritikus feszültségre, amelyet az irodalom attitűd-viselkedés résnek nevez: a deklarált értékek és a tényleges vásárlási döntések között jelentős szakadék tátong, különösen árérzékeny piaci szegmensekben. Ez azt jelenti, hogy a fogyasztói értékvtáltás önmagában csak kivételes esetekben képes elégséges keresleti nyomást generálni; szabályozói és szervezeti támogatás nélkül a fogyasztói fordulat hatása korlátozott marad. A második, szervezeti-kulturális szinten az értékek az innováció belső logikáját és prioritásait határozzák meg. A *sustainable innovational values* modell (Kratzer et al., 2021) és a *value-sensitive absorptive capacity* koncepció (Garst et al., 2022) azt mutatja, hogy azok a szervezetek, amelyek képesek ténylegesen integrálni a társadalmi értékelvárásokat innovációs stratégiájukba, hosszú távon versenyképesebbek is. Ugyanakkor ez a szint is tartalmaz feloldatlan feszültséget: a rövid távú pénzügyi teljesítménykényszer és a hosszú távú fenntarthatósági célok között strukturális ellentét feszül, amelyet a belső értékek önmagukban nem tudnak feloldani – ehhez külső szabályozói ösztönzők is szükségesek.

A harmadik, szabályozói-intézményi szinten az ESG-elvárások, transzparenciakövetelmények és fenntarthatósági standardok olyan keretet teremtenek, amelyek kikényszerítik az értékalapú innovációt még ott is, ahol a szervezeti kultúra erre önként nem lenne hajlandó. A Porter-hipotézis empirikus igazolása (Galeotti et al., 2020) azonban fontos korlátra hívja fel a figyelmet. A szabályozói szigor innovációösztönző hatása általában csekély és a különböző szabályozási eszközök között csak korlátozott eltérések mutathatók ki. Ez azt sugallja, hogy a szabályozás szükséges, de nem elégséges feltétele a valódi fenntartható innováció kibontakozásának.

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat központi állítása, hogy a fenntartható innováció emberi dimenziója három egymással összefüggő szinten ragadható meg: a fogyasztói-társadalmi értékváltás, a szervezeti-kulturális működés és a szabályozói-intézményi környezet szintjén. A fogyasztói szint keresleti nyomást teremthet a fenntartható megoldások iránt, a szervezeti szint az innovációs prioritásokba és döntési kultúrába építi be a fenntarthatósági értékeket, míg a szabályozói szint keretet, ösztönzőket és transzparenciakövetelményeket ad ezek érvényesüléséhez. E három szint csak együttesen képes valódi fenntarthatósági fordulatot előidézni; külön-külön mindegyik korlátozott hatású. A három szint azonosításán túl a dolgozatban feldolgozott irodalom alapján három olyan feszültségpontot tartok különösen fontosnak, amelyeket a jelenlegi kutatások nem kezelnek kielégítően.

Az első a mérhetőség problémája. Az AI energiafogyasztásának és a greenwashing jelenségének vizsgálata rámutat, hogy az emberi értékek és szükségletek innovációra gyakorolt hatása nagyrészt kvalitatív és közvetett mutatókban nehezen operacionalizálható. A *sustainability model cards* javaslat (Jouneaux & Cabot, 2025) vagy az Eco2AI eszköz (Budennyy et al., 2022) az AI-szektorban kísérli meg ezt a mérhetőségi problémát megoldani, de az általánosabb, szektorsemleges megközelítés hiányzik.

A második a rebound-hatás kezelésének hiánya. Az irodalom döntő többsége az emberi értékek pozitív, fenntarthatóság felé terelt hatására fókuszál, és kevés figyelmet fordít arra, hogy a hatékonyságnövelő innovációk – éppen azért, mert olcsóbbá teszik a fogyasztást – növelhetik az összkibocsátást. Ez az AI-szektor esetében különösen élesen jelenik meg: a Green AI törekvések egyéni modell szintjén valós megtakarításokat eredményezhetnek, de a globális AI-felhasználás robbanásszerű növekedése mellett az abszolút kibocsátás tovább emelkedik.

A harmadik feszültségpont a Max-Neef-féle szükséglet-kielégítő keret (Max-Neef et al., 1991) és az AI-fejlesztési gyakorlat közötti szakadék. A *Human Scale Development* elmélet szerint különbséget kell tenni az alapvető emberi szükségletek és azok konkrét kielégítői között: a szükségletek viszonylag állandók, míg a kielégítésükre szolgáló technológiai, társadalmi vagy fogyasztási módok történetileg és kulturálisan változnak (Max-Neef et al., 1991). Ez a keret lehetővé tenné, hogy az AI-rendszerek tervezésekor explicit módon feltegyük a kérdést: valóban alapvető emberi szükségletet elégít-e ki az adott technológia, vagy csupán egy meglévő, erőforrás-igényes kielégítési módot helyettesít egy még erőforrás-igényesebbel? Ennek a szükséglet-kielégítő megkülönböztetésnek a szisztematikus alkalmazása az AI-fejlesztési folyamatban eddig hiányzik a szakirodalomból.

Az elemzés alapján a fenntartható innováció emberi dimenziója nem redukálható sem pusztán fogyasztói preferenciákra, sem szervezeti kultúrára, sem szabályozói környezetre – valódi fenntarthatósági fordulat csak akkor lehetséges, ha mindhárom szint egyszerre, koherens irányba mutat. Az AI-szektor esete ezt különösen jól példázza: egy technológia, amelynek energialábnyoma iparági léptékű, és amelynek fejlesztési irányát ma döntően néhány nagy piaci szereplő értékrendje határozza meg, nem kezelhető pusztán technikai kérdésként.

Fontos ugyanakkor jelezni e dolgozat korlátait is. A feldolgozott irodalom döntően angol nyelvű, nyugati és kelet-ázsiai kontextusból származik; a globális Dél perspektívája alulreprezentált. A szisztematikus irodalomelemzés módszertana nem teszi lehetővé ok-okozati kapcsolatok bizonyítását – az azonosított összefüggések korrelatív jellegűek.

Jövőbeli kutatások feladata lehet e kapcsolatok empirikus tesztelése, különösen a három szint interakciójának vizsgálata konkrét innovációs eseteken keresztül

IRODALOMJEGYZÉK

Gonda, T. (2022): *Alternatív turizmus*, Akadémiai Kiadó.
<https://doi.org/10.1556/9789634547686>

Oksanen, K. & Hautamäki, A. (2015): *Sustainable innovation: A competitive advantage for innovation ecosystems*, Technology Innovation Management Review, 5(10), 24–30.

Diepenmaat, H., Kemp, R. & Velter, M. (2020): *Why sustainable development requires societal innovation and cannot be achieved without this*, Sustainability, 12(3), 1270.
<https://doi.org/10.3390/su12031270>

Semenova, V. V., Mazur, V. V., Koshel, I. S., Svistunova, E. A. & Egorov, Y. V. (2024): *Innovation and engineering education: New challenges for achieving sustainable development goals*, Sustainable Economies, 2(3), 36. <https://doi.org/10.62617/se.v2i3.36>

Kratzer, J., Knyphausen-Aufseß, D. & Festel, G. (2021): *Glancing through two decades of research on the human side of sustainable innovation: The past, the present, and directions for future research*, Sustainability, 13, 6355. <https://doi.org/10.3390/su13116355>

Málovics, G. & Bajmócy, Z. (2009): *A fenntarthatóság közgazdaságtani értelmezései*, Közgazdasági Szemle, 56(5), 464–483.

Haskell, L., Bonnedahl, K. J. & Stål, H. I. (2021): *Social innovation related to ecological crises: A systematic literature review and a research agenda for strong sustainability*, Journal of Cleaner Production, 325, 129316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129316>

Angelo, F. D., Jabbour, C. J. C. & Galina, S. V. (2012): *Environmental innovation: In search of a meaning*, World Journal of Entrepreneurship, Management and Sustainable Development, 8(2–3), 113–121. <https://doi.org/10.1108/20425961211247734>

Galeotti, M., Salini, S. & Verdolini, E. (2020): *Measuring environmental policy stringency: Approaches, validity, and impact on environmental innovation and energy efficiency*, Energy Policy, 136, 111052. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111052>

Pagani, M. (2025): *Conclusions: Unlocking the potential of artificial intelligence*, In: *Artificial Intelligence for Ecology, Health, and Education*, Edward Elgar Publishing.

Mgpl, N. & Mandaleeka, A. P. (2025): *Technology governance for a living planet: Embedding ethical considerations in high-tech development*, In: 2025 IEEE International Symposium on Technology and Society (ISTAS) (pp. 1–6), IEEE.

Maharani, A. (2025): *Human-AI collaboration: Unlock the true potential of AI for environmental change*, In: Tariq, M. & Sergio, R. (szerk.): *Cases on AI-Driven Solutions to Environmental Challenges* (pp. 23–42), IGI Global Scientific Publishing.

Bethlendi, A. & Póra, A. (2021): *Lakossági zöldpénzügyek: Fókuszban a kereslet*, Public Finance Quarterly, 66(3).

Mónus, F., Béres, T. & Sipos, F. (2022): *Egyetemi hallgatók környezettudatossága a materializmus, az étellel való elégedettség, a politikai, illetve a pandémiával kapcsolatos nézeteik függvényében*, METSZETEK Társadalomtudományi Folyóirat, 11(1), 70–97. <https://doi.org/10.18392/metsz/2022/1/5>

Szűcs, R. S. (2025): *A felújított okostelefonok piaca a fenntarthatósággal összefüggésben*, Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok, 20(1), 87–98. <https://doi.org/10.14232/jtgf.2025.1.87-98>

Rutkowska, M., Bartoszczuk, P. & Singh, U. S. (2021): *Management of green consumer values in renewable energy sources and eco innovation in India*, Energies, 14(21), 7061. <https://doi.org/10.3390/en14217061>

Bednar, K. & Spiekermann-Hoff, S. (2020): *On the power of ethics: How value-based thinking fosters creative and sustainable IT innovation*, WU Vienna University of Economics and Business, Working Papers / Institute for IS & Society. <https://doi.org/10.57938/18523236-e0d8-4415-b7a6-88ac7b9fd27e>

Garst, J., Blok, V., Jansen, L. & Omta, O. S. W. F. (2022): *From value sensitive design to values absorption: Building an instrument to analyze organizational capabilities for value-sensitive innovation*, Journal of Responsible Innovation, 9(2), 196–223. <https://doi.org/10.1080/23299460.2022.2069994>

Huba, M. (2022): Human values for a sustainable future from the Czech and Slovak perspective, Envigogika, 17(1). <https://doi.org/10.14712/18023061.638>

Talgorn, E. & Ullerup, H. (2023): *Invoking 'empathy for the planet' through participatory ecological storytelling: From human-centered to planet-centered design*, Sustainability, 15(10), 7794. <https://doi.org/10.3390/su15107794>

Gunawan, W. B. & Mikhail, L. (2025): *Strategic and sustainable human resource management: Twin weapon for achieving competitive advantage in organization*, Priviet Social Sciences Journal, 5(6), 45–58. <https://doi.org/10.55942/pssj.v5i6.401>

Doulami, E. & Dimitriou, A. (2026): *Leadership and internal policy in sustainable schools: Exploring the perceptions of primary education executives in Greece*, Interdisciplinary Journal of Environmental and Science Education, 22(1), e2606. <https://doi.org/10.29333/ijese/17763>

Kim, M. K., Yoo, T. A. & Chung, J. B. (2026): *Toward sustainable AI: A scoping review of carbon footprint and environmental impacts across training and inference stages*, IEEE Access, 14, 18881–18896. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3659894>

Luccioni, A. S. & Hernandez-Garcia, A. (2023): *Counting carbon: A survey of factors influencing the emissions of machine learning*, arXiv.

Dorsey, H., Overton, J. & Wayne, L. (2025): *Energy-efficient machine learning models for sustainable computing*. <https://doi.org/10.54660/IJMFD.2026.7.1.19-27>

Laaroussi, A., Albakri, M., Megange, P. & Alshehhi, A. G. A. (2025): *Artificial intelligence and environmental sustainability: A balanced path to innovation and responsibility*, In: E3S Web of Conferences, 675, 03007.

- Kausar, Z., Latif, S., Shahzad, R. K. & Fatima, M. (2025): *Quantifying the climate risk of generative AI: Region-aware carbon accounting with G-TRACE and the AI sustainability pyramid*, arXiv.
- Desroches, C., Chauvin, M., Ladan, L., Vateau, C., Gosset, S. & Cordier, P. (2025): *Exploring the sustainable scaling of AI dilemma: A projective study of corporations' AI environmental impacts*, arXiv.
- Trinci, T., Magistri, S., Verdecchia, R. & Bagdanov, A. D. (2024): *How green is continual learning, really? Analyzing the energy consumption in continual training of vision foundation models*, In: European Conference on Computer Vision (pp. 300–317), Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92089-9_19
- Udatha, C. & Lakshmeeswari, G. (2024): *Energy-efficient task scheduling using a novel metaheuristics approach in cloud data centers*, In: 2024 1st International Conference on Cognitive, Green and Ubiquitous Computing (IC-CGU) (pp. 1–7), IEEE.
- Zeng, T. & Wu, X. (2024): *An energy-efficient virtual machine placement algorithm based on improved grouping GA*, In: 2024 IEEE 7th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEED) (pp. 737–740), IEEE.
- Verdecchia, R., Cruz, L., Sallou, J., Lin, M., Wickenden, J. & Hotellier, E. (2022): *Data-centric green AI: An exploratory empirical study*, In: 2022 International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S) (pp. 35–45), IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICT4S55073.2022.00015>
- Yarally, T., Cruz, L., Feitosa, D., Sallou, J. & Van Deursen, A. (2023): *Uncovering energy-efficient practices in deep learning training: Preliminary steps towards green AI*, In: 2023 IEEE/ACM 2nd International Conference on AI Engineering–Software Engineering for AI (CAIN) (pp. 25–36), IEEE. <https://doi.org/10.1109/CAIN58948.2023.00012>
- Yang, Z., Meng, L., Chung, J. W. & Chowdhury, M. (2023): *Chasing low-carbon electricity for practical and sustainable DNN training*, arXiv.
- Patterson, D., Gonzalez, J., Hölzle, U., Le, Q., Liang, C., Munguia, L. M. ... Dean, J. (2022): *The carbon footprint of machine learning training will plateau, then shrink*, Computer, 55(7), 18–28. <https://doi.org/10.1109/MC.2022.3148714>
- Tedla, M., Kulkarni, S. & Vaidhyanathan, K. (2024): *EcoMLS: A self-adaptation approach for architecting green ML-enabled systems*, arXiv:2404.11411. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.11411>
- Tyan, J., Liu, S.-C. & Fu, J.-Y. (2024): *How environmental, social, and governance implementation and structure impact sustainable development goals*, Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 31(4), 3235–3250. <https://doi.org/10.1002/csr.2721>
- Ding, H., Wang, Z., Xu, H. & Lin, Z. (2024): *A study on the impact of board characteristics on the environmental, social, and governance (ESG) responsibilities of listed companies—Evidence from Chinese listings*, Sustainability, 16(23), 10490. <https://doi.org/10.3390/su162310490>

- Athari, S. A., Saliba, C., Abboud, E. & El-Bayaa, N. (2024): *Examining the quadratic impact of sovereign environmental, social, and governance practices on firms' profitability: New insights from the financial industry in Gulf Cooperation Council countries*, Sustainability, 16(7), 2783. <https://doi.org/10.3390/su16072783>
- Li, G., Sun, Z., Wang, Q., Wang, S., Huang, K., Zhao, N., Di, Y., Zhao, X. & Zhu, Z. (2023): *China's green data center development: Policies and carbon reduction technology path*, Environmental Research, 231(Part 3), 116248. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116248>
- Vashishth, D., Sasikumar, K., Wagner, M. & Lämmel, R. (2025): *On-device fault classification for industrial environments: Leveraging hierarchical CNNs for energy efficiency*, In: 2025 IEEE 30th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1–4), IEEE.
- Barros, T. D. S., Giroire, F., Aparicio-Pardo, R. & Moulhierac, J. (2025): *Small is sufficient: Reducing the world AI energy consumption through model selection*, arXiv.
- Budenny, S. A., Lazarev, V. D., Zakharenko, N. N., Korovin, A. N., Plosskaya, O. A., Dimitrov, D. V. E. ... Zhukov, L. E. E. (2022): *Eco2AI: Carbon emissions tracking of machine learning models as the first step towards sustainable AI*, Doklady Mathematics, 106(Suppl. 1), S118–S128. <https://doi.org/10.1134/S1064562422060230>
- Jouneaux, G. & Cabot, J. (2025): *Towards sustainability model cards*, arXiv.
- Shekhar, A. & Aleem, A. (2024): *Improving energy efficiency through green cloud computing in IoT networks*, In: 2024 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (IC2PCT) (pp. 929–933), IEEE.
- Siddique, M. A., Karim, S., Haque, M. R. & Mia, P. (2026): *The truth behind sustainability claims: Examining carbon risk, ESG disclosures, and greenwashing*, International Review of Financial Analysis, 109, 104735. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2025.104735>
- Mhlanga, D. (2025): *AI beyond efficiency, navigating the rebound effect in AI-driven sustainable development*, Frontiers in Energy Research, 13. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1460586>
- Luccioni, A. S., Strubell, E. & Crawford, K. (2025): *From Efficiency Gains to Rebound Effects: The Problem of Jevons' Paradox in AI's Polarized Environmental Debate*, arXiv.
- Max-Neef, M. A., Elizalde, A. & Hopenhayn, M. (1991): *Human Scale Development: Conception, Application and Further Reflections*, New York: The Apex Press.