

SZALAVETZ ANDREA

Digitális átalakulás és fenntarthatóság

A technológioptimista környezetgazdászok és a pesszimista ökológiai közgazdászok közötti vita újraindítása

A cikk a technológiai fejlődés környezeti fenntarthatóságra gyakorolt hatásainak örökzöld kérdését helyezi nagyító alá a digitális átalakulás – vagyis az új műszaki-gazdasági paradigmát ígérő technológiai változások – szempontjából. A szakirodalom szisztematikus feltérképezésével számba veszi a digitális átalakulás környezeti fenntarthatóságra gyakorolt hatásait, a technológioptimista környezetgazdászok és a pesszimista ökológiai közgazdászok érveit, arra a kérdésre keresve a választ, hogy valóban paradigmaváltást jelent-e a digitális átalakulás a környezeti fenntarthatóság szempontjából. Megállapítja, hogy bár az új technológiák segítségével nagyobbat léptünk előre, mint valaha, a környezeti fenntarthatóság változó, fejlődő tartalmú célkitűzésének megvalósításában, mindazonáltal Carlota Perez előrejelzése, amely szerint „globális zöld aranykor” következik, túlzásnak tekinthető: a környezeti fenntarthatóság nem került belátható közelségbe.*

Journal of Economic Literature (JEL) kód: O33, Q55, Q56.

Bevezető

Az innováció-gazdaságtan egyik élő klasszikusa, Carlota Perez *Kapitalizmus, technológia és a globális zöld aranykor* című cikkében meggyőződéssel érvelt amellett, hogy az információtechnológiai forradalom „kizöldíti” a gazdaságot: „képes lesz radikálisan csökkenteni a nyersanyag- és energiaigényt” (Perez [2015] 200. o). Paradigmaváltást jósolt, vagyis az ember és környezete kapcsolatának fundamentális megváltozását. Abból indul ki, hogy a digitális átalakulás nem kizárólag technológiai, hanem társadalmi és kulturális (életmódbeli) változásokat is hoz. Nem egyszerűen arról van szó, hogy néhány iparágban a termelés fajlagos inputigénye csökken, hanem az innovációk a gazdaság minden szegmensében jelentkeznek, és egymás hatását erősítik. Változik a fogyasztás szerkezete: (tovább) nő az immateriális szolgáltatások aránya. Változik az életmód

* A kutatás az OTKA (K116173) támogatásával valósult meg.

(megosztásos gazdaság) és a társadalmi és műszaki innovációk következtében a fogyasztók számára értéket jelentő javak összetétele is.

Írásában Perez túllépett a technológioptimisták hagyományos megközelítésén, akik meghatározott digitális megoldások hatásmechanizmusát műszaki, technológiai szempontból vizsgálva jutottak arra a következtetésre, hogy fenntarthatósági szempontból pozitív változásokra kerül sor (*Berman* [2012], *Duflou és szerzőtársai* [2012], *Kiel és szerzőtársai* [2017], *Stock–Seliger* [2016]).

Ez utóbbi szerzők tisztán technológiai megközelítését és ebből levont optimista következtetéseit ugyanis az ökológiai közgazdaságtan képviselői,¹ egyebek mellett, a környezet-gazdaságtan klasszikus egyenlete ($I = P \times A \times T$) alapján vitatják (például *Bajmócy–Málovics* [2011], *Holm–Englund* [2009], *Dahmus* [2014], *Vivanco és szerzőtársai* [2015]).² Az egyenlet azt mondja ki, hogy *I*, a teljes környezeti terhelés mértéke (*impact*) függ a demográfiai helyzet alakulásától, vagyis a lakosságszámtól (*P*, *population*), a lakosság jólététől (*A*, *affluence*), valamint a technológiai fejlődéstől, illetve annak környezetkímélő jellegétől (*T*, *technology*) (*Commoner* [1972], *Ehrlich–Holdren* [1972]).

Az ökológiai közgazdaságtan képviselő két ellenérvvel kérdőjelezi meg a zöld aranykor eljövételét. Egyrészt azt állítják, hogy – mint általában – a technológioptimisták figyelmen kívül hagyják a később érzékelhető, kedvezőtlen technológiai mellékhatásokat, sőt a kedvező hatások mértékét csökkentő egyéb, rendszerszintű ökológiai és gazdasági-társadalmi összefüggéseket is.³ Másrészt a „klasszikus” ellenérvet hozzák fel, jelesül, hogy a technológia változása az egyenlet többi összetevőjére is hatást gyakorol. Gyakori például, hogy a technológia fejlődésének kedvező környezeti hatásait a növekvő jólét gyengíti, kompenzálja: nő a fogyasztás, és ennek nyomán erősödik a környezet terhelése.⁴

¹ Lásd *Málovics–Bajmócy* [2009] összefoglaló elemzését a technológioptimista környezet-gazdaságtan és a rendszerszintű ökológiai megközelítést alkalmazó ökológiai közgazdaságtan nézeteinek és megközelítésmódjának különbségeiről. Jelen cikk egyik lektora ugyanakkor felhívta a figyelmet arra, hogy az álláspontok fenti kategorizálása túlzott egyszerűsítés. Egyrészt a két „oldal” nem válik el mindig élesen egymástól, másrészt az optimista–pessimista besorolás helyett az ökológiai közgazdaságtan álláspontját precízebb úgy jellemezni, hogy az a fenntarthatóságot alapvetően nem technológiai kérdésként kezeli, megoldáskeresési stratégiája nem a technológiai változást helyezi középpontba.

² Az egyenletről lásd például *Chertow* [2000], az egyenlet kritikájáról: *Bajmócy–Málovics* [2011], *Kocsis* [2010], *York és szerzőtársai* [2003].

³ Mivel a rendszerszintű összefüggések részletes kifejtése meghaladná e tanulmány kereteit, álljon itt egyetlen példa csupán, az esetleges technológiai mellékhatások érzékeltetésére. Komoly várakozások övezik egyes nanotechnológiai alkalmazások kedvező közvetlen és közvetett környezeti hatásait. Az előbbire példa a technológia hatékony felhasználása a szennyezett vizek tisztításához, az utóbbira az új anyagok felhasználása például a gépkocsi súlyának csökkentéséhez vagy az üzemanyagok hatékonyságának növeléséhez. A nanotechnológia alkalmazásával létrehozott új anyagok esetleges toxikusságából, egészségre ártalmas hatásaiból fakadó kockázatokat ma még nem lehet egyértelműen cáfolni, sem azt a feltételezést, hogy a lebomló nanorészecskék a környezetben megtalálható egyes anyagokkal kölcsönhatásba kerülve egészségre ártalmas kémiai változásokat indukálnak (*Gómez-Pastora és szerzőtársai* [2014], *Klaine és szerzőtársai* [2012]).

⁴ Ezt a mechanizmust írja le a környezet-gazdaságtan másik klasszikus, az úgynevezett visszapattanó hatásról szóló tézise (más néven a Jevons-paradoxon – *Alcott* [2005]). A visszapattanó hatás nem csupán a teljes gazdaság szintjén, hanem gyakran termékszinten is érvényesül. A technológia fejlődése következtében csökkenhet például egy adott termék használatának mind a költsége, mind a környezeti terhelése (energiafogyasztása), ami más gazdasági és esetleg hibás gazdaságpolitikai mechanizmusokkal kölcsönhatásban ahhoz vezethet, hogy összességében nő az adott termék iránti kereslet, így az erre visszavezethető

Ha azonban paradigmaváltás következik be, vagyis akár maga az egyenlet is átalakul, akkor Perez optimizmusát más hangzatos aranykor-előrejelzéseknél megalapozottabbnak tekinthetjük.⁵

Mindenesetre – mint *Chertow* [2000] áttekintéséből kiderül – a technológiai fejlődés környezeti hatásainak vizsgálata lassanként örökzöld kérdéssé válik, és nem véletlen, hogy az innovációk sűrűsödésének időszakában (lásd *Szanyi* [2018] a műszaki fejlődés hosszú távú ciklusairól) a digitális átalakulás korszakában kiéleződik a technológiaoptimisták és -pesszimisták közötti vita.

Ez a tanulmány ehhez a vitához kíván hozzájárulni. A szakirodalom szisztematikus feltérképezésével összefoglalja a digitális átalakulás környezeti fenntarthatóságra gyakorolt kedvező hatásait és az ezekkel kapcsolatos kritikákat, valamint választ keres arra a kérdésre, hogy környezeti fenntarthatósági szempontból valóban paradigmaváltást jelent-e a digitális átalakulás.

A digitális átalakulás kifejezéssel a hozzáadottérték-termelést forradalmasító új technológiai megoldások gyűjtőfogalmára utalunk. Az alaptermotechnológiák közé tartoznak, egyebek mellett, a kiberfizikai rendszerek, a mesterséges intelligencia, a nagy adattömegek generálásának és elemzésének technológiája, a gépi látás, a 3D nyomtatás és a blokklánc. A legfontosabb alkalmazások: az autonóm járművek, az üzleti folyamatok robotizálása és automatizálása, a felhőalapú megoldások, a mesterséges-intelligencia-alapú döntéstámogatási megoldások, a szimuláció, virtualizáció, a kiterjesztett valóság, valamint az okos-infrastruktúra, például okosvárosok (*Müller és szerzőtársai* [2018], *Stock–Seliger* [2016]).

E technológiák elterjedése néhány olyan változással – *Kerekes* [2012] kifejezésével: rendszer-innovációval – járt, amelyek a fejlődés paradigmaticusan új stációjára utalnak. Új üzleti, közszolgáltatási és fogyasztási modellek terjedtek el (*Szalavetz* [2017]), társadalmi-kulturális változásokra utaló jeleket figyelhetünk meg (megosztásos gazdaság), és átalakulhat az értékláncok földrajzi szerveződése.

A fenntarthatóságnak sokféle definíciója szerepel a szakirodalomban, nem alakult ki egységesen elfogadott változat (lásd például *Kerekes* [2006], *Málovics–Bajmócy* [2009], *Montiel–Delgado–Ceballos* [2014]). Bár a gyakran idézett Brundtland-jelentésben (*WCED* [1987]) szereplő definíciót (olyan fejlődést tekinthetünk fenntarthatónak, amely kielégíti a jelen generáció szükségleteit, és egyúttal nem veszélyezteti a jövő generációk szükségletkielégítési esélyeit) sok kritika érte (például *Banerjee* [2003]), a tanulmány ebből indul ki, azzal a kiegészítéssel, hogy a fenntarthatóságot *folyamatosan változó, fejlődő tartalmú célkitűzésnek*, nem pedig valamilyen ideális *állapotnak* tekinti. Az elemzés csupán környezeti (ökológiai) szempontokra terjed ki, vagyis a fejlődés gazdasági,

tő energiafogyasztás is – lásd *Davis és szerzőtársai* [2014] esettanulmányát az energiahatékonyság növelése érdekében meghirdetett támogatott hűtőszekrénycsere-program „eredményeiről” Mexikóban.

⁵ Optimizmusával Perez nincs egyedül. *Kurzweil* [2005] technológiaszingularitás-elméletének követői (például *Diamandis–Kotler* [2012], *Rifkin* [2011]) a digitális átalakulással felgyorsuló műszaki fejlődéstől – egyebek mellett – a fenntarthatósággal kapcsolatos problémák megoldását is várják. A technológiai szingularitás elmélete azt mondja ki, hogy a technológiai fejlődés gyorsul, üteme idővel exponenciálissá válik, és ha ez az időszak elérkezik, forradalmi, ma még elképzelhetetlen változások várhatók a társadalmakban, gazdaságokban és az emberek életkörülményeiben.

környezeti és társadalmi szempontból vizsgált fenntarthatóságának hármas egységéből (*Elkington* [1997]) csupán az egyik dimenzióval foglalkozik.

A továbbiakban először a kutatás módszerével, majd az összegyűjtött adatok összefoglalásával és elemzésével ismerkedhet meg az olvasó. Az utolsó fejezet tartalmazza a következtetéseket és az összegzést.

Kutatási módszer

A kutatás induktív tartalomelemzésre épül (*Krippendorff* [2004]): kvalitatív szövegelemzési technikára, amelyet olyan esetekben alkalmaznak, amikor egy meghatározott jelenség mélyebb megértéséhez, értelmezéséhez és az azzal kapcsolatos trendek feltárásához szükséges tudás töredezetten áll rendelkezésre. Ezt a módszert alkalmazta például *Moldavska–Welo* [2017] az iparvállalati fenntarthatóság fogalmának vizsgálatakor. A szerzőpáros a vonatkozó szakirodalom szisztematikus áttekintésével a fenntartható feldolgozóipar 89 (!) definícióját listázta, és elemezte, hogy a versengő definíciók milyen megközelítési módszerek szerint kategorizálhatók, és melyek a kapcsolódó fogalmak.

Az induktív tartalomelemzés, vagyis a töredezetten rendelkezésre álló információk feltérképezése, kategorizálása és értelmezése jelen kutatás esetében is jól alkalmazható, mivel a digitális átalakulásról és annak környezeti fenntarthatóságra gyakorolt hatásairól szóló információk eltérő, egymást alig tudomásul vevő diszciplínák szakirodalmában találhatók (környezet-gazdaságtan, műszaki tudományok, informatika, vállalat-gazdaságtan).

Mivel a tartalomelemzésre épülő következtetések esetében különösen fontos a kutatási eljárás pontos leírása, az alábbiakban részletesen bemutatjuk az adatgyűjtés és -elemzés folyamatát.

A szakirodalom összegyűjtésének első lépcsője a kereséshez használt kulcsszavak kiválasztása volt. A „digitális átalakulás” (*digital transformation, digitalization*) és kiegészítésül az előbbinél szűkebb kategória: az „ipar 4.0” szavak kiválasztása magától értetődőnek bizonyult, nehézséget inkább a kapcsolat másik oldala jelentett. A „fenntarthatóság” (*sustainability*) kulcsszó kezelhetetlen mennyiségű találatot eredményezett a Google Scholar adatbázisában, még akkor is, ha a keresést a 2014 után megjelent publikációkra szűkítettük (kiindulva abból, hogy a digitális átalakulás viszonylag új keletű fejlemény).⁶ Ennél is komolyabb problémát jelentett, hogy a kapott találatok nagy része nem feltétlenül a két fogalom közös halmazát: a digitális átalakulás környezeti fenntarthatóságra gyakorolt hatását helyezte nagyító alá, a legtöbb cikk műszaki részterületeket tárgyalt. Ugyanez a probléma merült fel a Google Scholarnál szűkebb merítésű keresés alkalmazásakor. Az Elsevier kiadó folyóirat-adatbázisán belül a 2014 utáni szakcikk állományában a címre, kulcsszóra és absztraktokra szűkítve, megismételt kereséssel ugyan a találatok száma már kezelhetővé vált, a cikkek oroszlánrészének tartalma azonban nem volt a várakozásnak megfelelő.

⁶ *Digitalization AND sustainability*: 7380 találat; *industry 4.0 AND sustainability*: 3270 találat.

Mindazonáltal néhány, az elemzésben később fontosnak bizonyuló publikáció (például Sarkis–Zhu [2018], Schaltegger és szerzőtársai [2012], Stock–Seliger [2016]) elolvasása hozzásegített, hogy célzottabb keresésekkel pontosabb találati listát kapjunk. Elsőként a „digitális átalakulás” („ipar 4.0”), illetve a „fenntarthatóság” kulcsszavak mellé felvettük a „leválaszt” (*decoupling*) kifejezést is, másodikként pedig – e cikk kutatási kérdéséből kiindulva – a két alapvető keresőszót a(z „új) paradigma” kifejezéssel egészítettük ki.

A gazdasági növekedés és fejlődés, valamint az ezzel összefüggő környezeti terhelés szoros kapcsolatának lazítása, feloldása (*decoupling*) a környezet-gazdaságtan egyik legfontosabb kutatási területe (Grossman–Krueger [1995], OECD [2011], Schandl és szerzőtársai [2016], Szigeti és szerzőtársai [2017], UNEP [2011], [2016]). Mivel az összefüggés szorosságának mérséklődését, vagyis az egységnyi növekedéshez szükséges pótlólagos nyersanyag- és energiafelhasználás (és az ebből következő pótlólagos üvegházhatású gáz kibocsátás) arányának javítását részben a (szabályozásvezérelt) technológiai fejlődés,⁷ részben pedig rendszerszintű innovációk, vagyis új paradigma mozdíthatja elő, a kétszer három keresőszó alkalmazása a korábbiaknál pontosabb találati listát eredményezett.

Az így kapott releváns találatok kiegészültek az összegyűjtött szakirodalomban szereplő – sokatmondó további információt ígérő – hivatkozásokkal. Az elemzéshez ily módon gyűjtött forrásanyag összességében 37 publikációból áll. A kiinduló mintát célzott keresések egészítették ki. Célzott keresésekre néhány kapcsolódó téma⁸ pontosabb értelmezéséhez volt szükség. Ilyen módon a kiinduló minta 59 publikációval egészült ki.

A minta elemzésekor tematikai csoportosítást alkalmaztunk: az áttekintett tanulmányok fő megállapításait elemezve csoportokat képeztünk. A csoportosítás egyik elve az volt, hogy a tanulmányok a digitális technológiáknak az ökológiai hatékonyságra gyakorolt hatását vagy a paradigmaváltoztató hatásait tárgyalják. A kategorizálást szolgáló másik kérdés az áttekintett írások érveit, értékelését vizsgálta. Az egyik csoportba a technológiaoptimista, a kedvező hatásokat előtérbe helyező tanulmányok kerültek, a másikba pedig az ezekkel kapcsolatos kritikákat, ellenérveket soroló álláspontot képviselő írások.

⁷ A nyersanyag- és energiaigényes tevékenységek kihelyezése természetesen a technológia környezetkímélő fejlődését jóval meghaladó mértékű *statisztikai* javulást idézett elő a fejlett országokban (Wiedmann és szerzőtársai [2013]). Javulást eredményezett ezenfelül – szintén a technológia fejlődésével és diffúziójával összefüggésben – a gazdasági fejlődés (lásd Dinda [2004] a környezeti Kuznets-görbe irodalmáról), pontosabban, a gazdasági fejlődéssel járó szerkezeti változások (a szolgáltatások gazdasági súlyának növekedése) és a korábbiaknál jobb műszaki megoldások (kevésbé szennyező technológia) alkalmazása a termelésben. (A környezeti Kuznets-görbe kritikájáról lásd például Dombi–Málovics [2015], Stern [2004].)

⁸ Például ritkaföldfémek környezeti hatásai, additív gyártás környezeti hatásai, virtualizáció és digitális ikermegoldások, adatközpontok energiaigényessége, megosztásos gazdaság stb. A digitális átalakulás és a környezeti fenntarthatóság egyaránt multidiszciplináris téma, mindkettő nagy mennyiségű kapcsolódó fogalom hálójának csomópontjában helyezkedik el. A fogalmi háló alapján végzett vizsgálatokat az ipar 4.0 esetében jól példázzák Colledani és szerzőtársai [2014], illetve Monostori és szerzőtársai [2016], míg Moldavska–Welo [2017] a feldolgozóipari környezeti fenntarthatóság tárgyalásakor mutatja be a kapcsolódó fogalmak sokszínűségét.

Az adatgyűjtés eredményei

Az előzőkben ismertetett adatgyűjtés olyan mintát eredményezett, amelynek országnrészt a digitális átalakulás erőforrás- és ökológiai hatékonyságot erősítő, inputigényességet csökkentő hatásairól szóló írások tették ki. A cikkek megállapították, hogy a digitális technológiák alkalmazása nem csupán a termelés anyag- és energiaigényességét csökkenti, hanem az összes (digitalizált) üzleti folyamat esetében is magasabb fokozatba kapcsolja a széles értelemben vett pazarlás kiküszöbölését célzó *lean menedzsment* (Shah–Ward [2003]) gyakorlatát (Behrendt és szerzőtársai [2017], Buer és szerzőtársai [2018], Mrugalska–Wyrwicka [2017], Müller és szerzőtársai [2018]). Következésképpen, a szerzők szoros pozitív, oksági összefüggést feltételeznek a digitális átalakulás és a környezeti fenntarthatóság között.

E szerzők optimizmusát jó néhány írás igyekezett cáfolni, árnyalni és felhívni a figyelmet a digitális átalakulás árnyoldalaira. Számos tanulmány hangsúlyozta például, hogy nem csupán a hardvereszközök, adatközpontok és az ipar 4.0 rendszerek kritikus nyersanyag-⁹ és energiaigényessége jelent komoly környezeti terhet, hanem az eszközök mennyiségéből és rövid életciklusából következően felhalmozódó elektronikai hulladék is jelentős szennyezést okoz (Arshad és szerzőtársai [2017], Fichter–Hintemann [2014], Melville [2012]).

Egy másik csoportba azok az írások tartoznak, amelyek a digitális technológiák paradigmaváltoztató hatásait vizsgálják a környezeti fenntarthatóság perspektívájából.

A cikkek kategorizálását nehezítette, hogy egyes technológiák/alkalmazások mindkét csoportban szerepelhetnének. A virtualizációnak¹⁰ például nem csupán az anyag- és energiamegtakarítási hatása számottevő, hanem a *helyettesítési* és a *gazdaságszerkezeti* hatása is (Kusiak [2018], Müller és szerzőtársai [2018]), így az e témát tárgyaló tanulmányok a paradigmaticus változások csoportjában (a következő alfejezet) szerepelnek. Egy másik példa az additív gyártás (3D nyomtatás). Egyértelmű anyag- és energiamegtakarítási hatása mellett¹¹ ez a technológia várhatóan előmozdítja, hogy meghatározott termékek gyártása decentralizálódjon, lokalizálódjon, így mérsékeli a szállításból fakadó környezeti terhelést. Az additív gyártásnak az értéklánc-összetételre gyakorolt hatása rendszerszintű, paradigmaticus változásnak tekinthető (Berman [2012]).

A továbbiakban az egyes csoportokba sorolt tanulmányok megállapításait az őket ért kritika tükrében foglaljuk össze.

⁹ Idetartoznak a ritkaföldfémek és néhány egyéb, geopolitikai vagy más szempontból kritikusnak tekintett nyersanyag. Ezek kitermelése és feldolgozása önmagában jelentős környezeti terhet jelent (Haque és szerzőtársai [2014], McLellan és szerzőtársai [2013]).

¹⁰ A virtualizációnak a fenntarthatóságra gyakorolt hatását tárgyaló cikkek két csoportba sorolhatók: a) a felhőalapú számítástechnikai megoldások környezetkímélő jellegét hangsúlyozó (Anwar és szerzőtársai [2018]) vagy cáfoló/árnyaló (Fichter–Hintemann [2014]) írások; b) az üzleti folyamatok digitalizációjáról szóló írások (lásd a következő alfejezetben).

¹¹ Lásd például Baumers és szerzőtársai [2017], Ford–Despeisse [2016], Gebler és szerzőtársai [2014].

Digitális átalakulás – az ökológiai hatékonyság növekedése és inputigényesség-csökkenés

A digitális átalakulást az ökológiai hatékonyságot erősítő, kisebb vagy jelentősebb fokozatos¹² innovációk sokasága kíséri.¹³ ezek a hozzáadott érték termeléséhez kapcsolódó üzleti folyamatok¹⁴ és nagyszámú egyéb folyamat¹⁵ optimalizálását, erőforrás- (nyersanyag- és energia-) igényük csökkentését és rugalmasságuk növelését¹⁶ célozzák.

A digitális átalakulás lényegi eleme ugyanis, hogy e technológiák segítségével megvalósul az értéktermelés szereplőinek minden korábbi mértéket meghaladó integrációja¹⁷ (digitális összeköttetése és valós idejű információi egymás folyamatairól – *Xu és szerzőtársai* [2018]). Ez nem csupán a vállalati és egyéb folyamatok nyersanyag- és energiafogyasztásának, valamint a környezetre gyakorolt hatásának korábbiaknál pontosabb mérését és optimalizálását teszi lehetővé, hanem a termékek életciklus-szemléletű menedzsmentjét is (*Pagoropoulos és szerzőtársai* [2017]).

Mivel e tanulmánynak nem célja a digitális átalakulásnak köszönhető ökológiai hatékonyság-növekedés konkrét hatásmechanizmusainak számbavétele és elemzése, hanem e hatás ökológiai szempontú kritikájának kritikai elemzése, a továbbiakban a kritikai megállapításokkal foglalkozunk.

Az ökológiai gazdaságtan képviselői elismerik ugyan az ökológiai hatékonyság növekedését, de két alapvető kritikai észrevételt tesznek. Egyrészt azt hangsúlyozzák,

¹² Néhány innovációtól (például 3D nyomtatás) az ökológiai hatékonyság forradalmi javulását remélik a szerzők. Mivel 1. a környezeti hatás mértéke függ az eredeti megoldások további fejlődésétől és elterjedésétől; 2. az e technológiák kezdeti alkalmazása óta eltelt idő túlságosan rövid ahhoz, hogy ezeket az életciklus-elemzések szigorú próbájának vethessék alá, az esetleges technológiai mellékhatások még váratnak magukra; továbbá 3. az ökológiai hatékonyság erősödése témájában a „forradalmi” és a „fokozatos” változás megkülönböztetése módszertani szempontból nem megoldott, az itt tárgyalt megoldások mindegyikét fokozatos javulást előidézőnek tekintjük.

¹³ Az új megoldásokat a leggyakrabban nem az ökológiai hatékonyság, hanem a versenyképesség erősítése vagy a költségek csökkentése céljával fejlesztették ki és alkalmazzák, az ökológiai hatékonyság erősödése csupán kedvező „mellékhatásnak” tekinthető (*Szalavetz* [2017]).

¹⁴ Például stratégiai tervezés, terméktervezés, gyártervezés, termelés- és kapacitásstervezés, termelésütemezés, eljárásfejlesztés, energiamenedzsment, karbantartás, minőség-ellenőrzés és -irányítás, ellátásilánc-menedzsment és beszerzés, logisztika, a foglalkoztatottak képzése, disztribúció, ügyfélkapcsolat-menedzsment, értékesítést követő szolgáltatások, újrahasznosítás, az egyes üzleti folyamatok dokumentálása (például időszakos termelési tervek és jelentések, az új feladatok munkaleírásai), adminisztrációja és menedzsmentje (például megrendelés, számlázás), pénzügyi menedzsment. A hosszú felsorolás érzékelteti, hogy a digitális megoldások *minden fronton* erősítik a(z ökológiai) hatékonyságot: nagyszámú kisebb-nagyobb hatás adódik össze.

¹⁵ Gondoljunk például a közigazgatás folyamatainak optimalizálására, az intelligens épületautomatizálásra, közlekedésszervezésre, az okos-energiahálózatokra, okosvárosokra vagy a blokklánc-megoldások alkalmazásához menedzselt (tehát az anyag- és energiaigényes pénzügyi közvetítőrendszert részben kiiktató) tranzakciókra.

¹⁶ A rugalmasság kedvező ökológiai hatása egyrészt abban mutatkozik meg, hogy a termelési folyamat átalakításának erőforrásigénye csökken, másrészt a termelt mennyiséget a fogyasztói igények pontosabb előrejelzése, az igények változásának gyorsabb felmérése és a skálahatékonyság jelentőségének relativizálódása révén könnyebben hozzá lehet igazítani a kereslethez. Így a kereslet ingadozása miatt eladhatatlanná vált árucikkek mennyisége csökken.

¹⁷ A digitális integráció egyrészt az ellátási lánc szereplőinek összeköttetését, másrészt az alaptevékenységhez kapcsolódó összes szolgáltatás összeköttetését jelenti: mindez megkönnyíti a termékek „bölcstől a sírig” (tervezéstől az újrahasznosításig és tovább) tartó életciklus-menedzsmentjét.

hogy ezek a pozitív (mennyiségi) hatások nem elegendők, a gazdasági tevékenység erőforrás-igényességének jóval nagyobb mértékű csökkenésére lenne szükség. A gazdasági tevékenység és a növekedés továbbra is jelentős környezeti terheléssel jár, nem valósult meg a „leválasztás” (*decoupling*).

Másrészt, azt mondják ki és igazolják (egyes részterületeken) konkrét számításokkal, hogy a technológia fejlődésének jelen szakaszában ugyanúgy érvényesül a kedvező folyamatokat minimum kompenzáló visszapattanó hatás, mint a fejlődés korábbi szakaszaiban. Mindebből azt a következtetést vonják le, hogy a digitális átalakulásra visszavezethető ökológiai hatékonyság-növekedés mennyiségi javulást hozott, a fenntarthatóság azonban minőségi változásokat igényel. Tekintsük át ezeket az érveket!

„A pozitív, de nem elégséges” érvrendszer a pesszimista ökológiai előrejelzések¹⁸ kiindulópontjából vizsgálja és tartja a szükségeset meg sem közelítő mértékűnek a digitális átalakulás ökológiai hatékonyságot javító hatásait (*Von Weizsäcker–Wijkman* [2018]).

Ide kapcsolódik az úgynevezett X-faktor-vita arról, hogy milyen arányban kellene a gazdasági tevékenység erőforrásigényét és (káros) környezeti hatásait mérsékelni,¹⁹ illetve arról, hogy a technológia fejlődése képes-e önmagában biztosítani az egységnyi erőforrás-felhasználás szükséges mértékű csökkenését, vagy a fenntartható fejlődés szempontjából elengedhetetlen a gazdaság és a társadalom minőségi átalakulása.

Ez a vita azonban nem vezet messzire, hiszen sem abban nincs egyetértés, hogy milyen súlyos a probléma (mennyi időn belül várható környezeti katasztrófa az eddigi erőfeszítések eredményeit nagyságrendileg meghaladó változások hiányában), sem abban, hogy mihez viszonyítsuk a csökkenést,²⁰ sem pedig abban, hogy a gazdasági tevékenység erőforrás-intenzitásának mekkora csökkentésére lenne szükség.²¹ Nem megoldott az egyes anyagok és szektorok súlyozása: kompenzálhatjuk-e két tonna szén vagy olaj megtakarításával, ha egy tonnával nő valamelyik kritikus nyersanyag felhasználása? Kompenzálhatjuk a vegyipar okozta környezeti ártalmak csökkentésével a mezőgazdasági tevékenység környezeti ártalmainak esetleges növekedését?²²

A másik oldalról, bár az ökológiai közgazdaságtan képviselői egyetértenek abban, hogy a fenntarthatóság a technológiai fejlődésre visszavezethető fokozatos ökológiai hatékonyság-növekedésnél nagyobb és gyorsabb, továbbá fokozatos és mennyiségi helyett *minőségi* változásokat igényel, nincsenek konkrétumok arról, hogy mit takar a változás minőségi jellege. Az „értékek”, „fogyasztási szokások” és az „életmód”

¹⁸ A klasszikus hivatkozás: *Meadows és szerzőtársai* [1972]. Modern kori követői: *Rockström és szerzőtársai* [2009], *Von Weizsäcker–Wijkman* [2018].

¹⁹ A kilencvenes években az eredeti koncepció (*Schmidt-Bleek* [1993]) az erőforrás-igényességet az akkori egyetizedére javasolta csökkenteni (Factor 10). A későbbi viták során az előirányzat csökkent (Factor 4 – *Von Weizsäcker és szerzőtársai* [1997]), illetve globális előirányzat helyett országonként javasolták meghatározni az erőforrás-hatékonyság növelésének szükséges mértékét (*Reijnders* [1998]).

²⁰ Lásd *UNEP* [2016] arról, hogy mekkora különbségekhez vezet egy-egy gazdaság kimutatott nyersanyag-igényességében, ha termelés-, illetve felhasználásalapú mutatószámokat használnak.

²¹ Ne feledjük, hogy a gazdasági tevékenység okozta környezeti problémák szektor-, technológia- és helyspecifikusak, így lett az eredeti Factor 10, Factor 4, Factor 5 koncepciókból Factor X.

²² Ráadásul a környezettudomány már régen bebizonyította, hogy az egyes erőforrások (víz, energia, nyersanyagok, élelmiszer, föld stb.) összefüggnek: az egyik erőforrás felhasználásának hatékonyabb tétele sokszor csak egy másik rovására érhető el (*Bleichwitz–Miedzinski* [2018], *McMahon–Price* [2011], *van den Bergh és szerzőtársai* [2015]).

megváltoztatása nem tekinthető egyértelmű, gazdaságpolitikailag értelmezhető javaslatnak. Ami ezekből a javaslatokból konkrét (például a termékek élettartamának, az újrafeldolgozás és -hasznosítás arányának növelése), az *technológiai fejlesztést igényel*, továbbá néhány olyan társadalmi és életmódbeli változást, amelyeket szintén a technológia fejlődése hozhat el (lásd a következő alfejezetben).

Az ökológiai hatékonyság növekedésének visszapattanó hatásait elemző írások többsége a digitális átalakulás energiafogyasztást növelő hatásait tárgyalja.²³ Bemutatják, hogy az energiahatékonyság látványos növekedése ellenére a teljes energiafogyasztás nem csökken, sőt a megállíthatatlanul növekvő adatforgalom miatt akár növekedhet is (*Andrae–Edler* [2015], *Hazas és szerzőtársai* [2016], *Hilty–Aebischer* [2015], *Hintemann és szerzőtársai* [2016], *Galvin* [2015], *Melville* [2012], *Pihkola és szerzőtársai* [2018]).

Petrides és szerzőtársai [2018] a fenti részterületnél átfogóbb, klasszikus visszapattanó hatást helyez nagyító alá: a digitális technológiákkal tökéletesített termékek iránti kereslet növekedését. A szerzők bemutatják, hogy a termékek anyag- és energiaigényességének fajlagos csökkenése szorosan összefügg műszaki paramétereik minőségi javulásával, ami – az árcsökkentő hatással együtt – az adott termék iránti kereslet növekedéséhez vezet. Egy további klasszikus visszapattanó hatás, a digitális megoldások iránti kereslet exponenciális növekedése a digitális átalakulás alaptermékjeinek általános jellegére vezethető vissza. A technológia alkalmazásai a gazdaság és a társadalom minden szegmensében változásokat indítanak el, ami növeli a javak (nem csupán a digitális megoldások, hanem összességében a termékek és szolgáltatások) termelésének és fogyasztásának mennyiségét és intenzitását (*Gossart* [2015]).

Digitális forradalom – új paradigma a termelésben és a fogyasztásban

A környezet-gazdaságtan kutatói általában azzal utasítják el a technológiai áttörések övezte optimizmust, hogy az új megoldások elterjedését erős útfüggőség akadályozza, többek között abból eredően, hogy a már elterjedt technológiák beépültek a fogyasztási, felhasználási szokásokba, továbbá befolyásolták a vállalatok értéklánc-kialakítási stratégiáját és üzleti modelljeit. Ennek megfelelően, vagyis az adott korszak technológiai megoldásait és lehetőségeit figyelembe véve alakult ki az intézményi és szabályozási struktúra. Következésképpen, a nem pusztán fokozatos javulást eredményező új megoldások elterjedéséhez egyrészt az adott megoldáshoz kapcsolódó technológiák és az infrastruktúra fejlesztésére van szükség, másrészt rendszerszintű (vállalatszervezeti, intézményi, gazdasági, társadalmi és kulturális) komplex változásokra (*Dosi* [1982]), illetve az egyes rendszerelemek

²³ *Hintemann és szerzőtársai* [2016] számításai szerint a németországi adatközpontok energiafogyasztása 2010 és 2015 között 15 százalékkal 12 milliárd kilowattóra nőtt. Az adatközpontok villamosenergia-fogyasztása a teljes (globális) fogyasztás 3 százalékát teszi ki. A kiberfizikai rendszerek adatforgalma és a mesterséges intelligencián alapuló megoldások térhódítása következtében e mutatók további gyors növekedése várható (*Hazas és szerzőtársai* [2016]). Mivel az adatközpont-kapacitás és a gazdasági fejlettség szoros pozitív összefüggést mutat, a fejlett országokban ezt az átlagot jóval meghaladó részarányal kell számolni. Nem véletlen, hogy a legnagyobb felhőszolgáltatók (Google, Amazon, Apple, Microsoft, Facebook stb.) komoly összegeket ruháznak be megújuló energiaforrásokba és az ezzel kapcsolatos kutatásokba (lásd például a Bloomberg összefoglalóját: *Eckhouse* [2017]).

együttes, egymással párhuzamos fejlődésére (*Bajmócy–Málovics* [2011]). Mindez időigényes, és az alaptechnológia alkalmazásának költségeit nagyságrendekkel meghaladó, bizonytalan kimenetelű beruházásokat igényel. Ezek az akadályok vezetnek összességében ahhoz a jelenséghez, amelyet a környezet-gazdaságtan kényszerkötődésnek, illetve az eredeti műszaki, gazdasági, intézményi, kulturális paradigmába való bezártságnak (*lock-in*) nevez (*Kemp–Oltra* [2011], *Seto és szerzőtársai* [2016], *Unruh* [2000]).

A digitális átalakulás fenntarthatóságra gyakorolt hatásainak technológiaoptimista elemzői ezeket a fenntartásokat is érvelésük középpontjába helyezik. Azt állítják, a digitális átalakulás *a*) helyettesítési, *b*) gazdaságszerkezeti, *c*) földrajzi (az értékláncok összetételét érintő) és *d*) társadalmi-kulturális hatásai összességükben új paradigmához, rendszerszintű változásokhoz vezetnek.

a) A *helyettesítési hatások* közé tartozik egyes termékek és szolgáltatások (például folyóiratok, könyvek, film, zene) digitalizálása, az üzleti folyamatok virtualizálása,²⁴ egyes ágazatok outputjának részleges digitalizált forgalmazása [ne csupán az árucikkek e-kereskedelmére gondoljunk: az egészségügy, oktatás és a pénzügyi szolgáltatások forgalmazása is (részlegesen) digitalizálódott] és a távmunka. Mindez jelentős mennyiségű nyersanyagot és energiát takarít meg, és csökkenti az ezekre a folyamatokra visszavezethető üvegházhatású gázok kibocsátását.

b) Ami a *gazdaságszerkezeti hatásokat* illeti, a digitális átalakulás régóta tartó tendenciát erősített fel: tovább nőtt a felhalmozás és a fogyasztás immateriális tartalmának hányada (*Ardolino és szerzőtársai* [2018]). Az immateriális tőkefelhalmozás egy két fejlett országban (Egyesült Államok, Egyesült Királyság) már meghaladja, más fejlett országokban megközelíti a bruttó állóeszköz-felhalmozást (*Corrado és szerzőtársai* [2013]). E változás fenntarthatósági hatása nem egyértelmű. Igaz ugyan, hogy az immateriális beruházások egy része (például az anyag- és energiaáramlás mérését és optimalizálását elősegítő informatikai tőkefelhalmozás) az ökológiai hatékonyságot erősíti, de egyrészt az immateriális tőkefelhalmozás nem *helyettesíti*, hanem *kiegészíti* a bruttó állóeszköz-felhalmozást, másrészt az immateriális tőkefelhalmozás összetevőinek²⁵ karbonlábnyoma is számottevő.

Ami a fogyasztás, ezen belül a feldolgozóipari termékek immateriális tartalmának növekedését illeti, ez a változás nem új keletű (a klasszikus hivatkozás: *Vandermerwe–Rada* [1988]), de a digitális átalakulás fokozta e tendencia intenzitását (*Coreynen és szerzőtársai* [2017], *Vendrell-Herrero–Wilson* [2017]). A feldolgozóipar és a szolgáltatások input- és outputoldalán egyaránt megnyilvánuló összefonódása (*Szalavetz* [2013]) folytatódott,

²⁴ Például virtuális termék- és folyamattervezés, a termelőberendezések virtuális üzembe helyezése, a folyamatok digitális (papírmentes) dokumentációja, üzleti célú utazások helyett videokonferenciák stb. (*Dahl és szerzőtársai* [2014], *Matsuda–Kimura* [2015], *Rosen és szerzőtársai* [2015], *Zhuang és szerzőtársai* [2018]). Ami a videokonferenciákat illeti, *Arnfolk és szerzőtársai* [2016] tanulmányos visszapattanó hatásról számoltak be: az utazás helyettesítésével megtakarított időt a foglalkoztatottak munkavégzésre fordították, ennek pótlólagos anyag- és energiaigénye részben kompenzálta a megtakarításokat.

²⁵ Az immateriális tőkeállomány részét képezi az informatikai tőke, a technológiai tőke és a vállalati kompetenciátőke. Ez utóbbi kategóriába sorolják az összes olyan vállalatspecifikus erőforrást, amelyek nem sorolhatók a másik két kategóriába, például idetartozik a márkaérték, a vállalatspecifikus emberi tőke, a know-how, az üzleti modell és a hálózati tőke, piaci tőke egyaránt (*Corrado és szerzőtársai* [2012]).

felgyorsult, a feldolgozóipari termékekhez kapcsolódó szolgáltatások a teljes feldolgozóipari árbevétel növekvő hányadát adják (*Mahut és szerzőtársai* [2017]).

Fenntarthatósági szempontból ez a változás nem ítéltető meg egyértelműen. Igaz ugyan, hogy meghatározott termékek (például termelőberendezések, tartós fogyasztási cikkek) esetében a teljes érték jóval nagyobb hányadát adja az immateriális tartalom, mint korábban, de ezzel az összes érték nőtt (az immateriális hányad nem a materiális rovására emelkedett), sőt visszapattanó hatással is számolhatunk.

A másik oldalról ugyanakkor a termékekbe ágyazott digitális szolgáltatások a felhasználás hatékonyságát erősítik, így közvetve a fogyasztást csökkentik. A gépkocsik esetében például a vezetést segítő, a baleseteket megelőző megoldások csökkentik az alkatrész-, illetve az új gépkocsik iránti igényt, az intelligens közlekedésirányítási rendszerekkel kapcsolatot tartó rendszerek mérsékelik a felesleges üzemanyag-felhasználást, a termelőberendezések esetében pedig a meghibásodást előre jelző analitikai rendszerek, a távkarbantartást segítő rendszerek növelik az adott termékek élettartamát (*Bressanelli és szerzőtársai* [2018]). A termék mint szolgáltatásplatform üzleti modellre általában is igaz az az állítás, hogy az adott termékek élettartama a versengő (nem platformalapú) termékekénél hosszabb (*Tukker* [2015]).

c) Ami a *földrajzi hatásokat* illeti, a termelési folyamatok robotizálásától és a 3D nyomtatás elterjedésétől az értékláncok szerkezetének földrajzi átalakulását várják. A 3D nyomtatás a termelés lokalizációját, az értékláncok rövidebbé válását hozhatja magával (*Berman* [2012], *Ford–Despeisse* [2016], *Rauch és szerzőtársai* [2016]), a termelési folyamatok robotizálása pedig az eddigi relokációs tendenciák megfordulását, a kihelyezett termelési folyamatok visszavételét a küldő országokba (például *Dachs és szerzőtársai* [2017]). Mindez összességében a szállítással járó környezeti terhek mérséklődéséhez vezet.

Az utóbbi fejlemények kedvező fenntarthatósági hatását árnyalni kívánó, kevésbé optimista ökológiai közgazdászok ugyanakkor joggal érvelhetnek azzal, hogy 1. a 3D technológia kiforratlan, sőt maga is szennyező, 2. kevés példát találunk a termelési folyamatok visszahelyezésére, az értékláncok rövidülésére (*Brennan és szerzőtársai* [2015], *Ford–Despeisse* [2016]), 3. ezek a változások is fokozatosak, nem forradalmiak. Korábban kezdődött tendenciák némi felerősödéséről van szó, nem pedig új paradigmáról.

d) Van azonban egy terület, a megosztásos gazdaság, ahol a digitális átalakulás akár forradalminak is tekinthető *társadalmi-kulturális változást* indított el. A megosztásos gazdaság gyűjtőfogalom, amelynek fejlődését, diverzifikálódását, szűkebb és tágabb értelmezéseit, valamint versengő definícióit *Martin* [2016] és *Acquier és szerzőtársai* [2017] részletesen tárgyalja. Jelen tanulmány a szűk, profitorientált értelmezést használja. Eszerint a megosztásos gazdaság olyan üzleti modell, amely a digitális platformok technológiájának felhasználásával hozzáférést tesz lehetővé a különböző javakhoz és szolgáltatásokhoz, vagyis megosztja azok használatát, és egyúttal kiiktatja a kínálat és a kereslet egymásra találásának hagyományos közvetítőit.²⁶

²⁶ A hagyományos közvetítők (gépkocsiszalonok, üzlethálózat, munkaközvetítők) kiiktatása és a közvetítés digitális platformra helyezése önmagában csökkenti a (közvetítéshez szükséges infrastruktúra kiépítésével, fenntartásával és a hagyományos közvetítők igénybevételével kapcsolatos utazásokkal járó) környezeti terhelést.

A kedvező környezeti hatások abban mutatkoznak meg, hogy a megosztásos modell („tulajdonlás” helyett a „hozzáférés”) csökkenti az új termékek iránti keresletet, növeli a javak kihasználtságát és ezzel közvetve az ökológiai hatékonyságot is.²⁷ Mivel a tulajdonjog a gyártónál marad, várható, hogy fejlesztéseikkel a tulajdonosok igyekeznek termékeik élettartamát növelni, továbbá a körforgásos gazdaság elveit is könnyebben érvényesítik (*Bressanelli és szerzőtársai* [2018]).

A digitális technológiák nem csupán a felhasználók közösségét fogják össze, vagyis szervezik meg és teszik lehetővé magát a megosztást, hanem elősegítik a termékek állapotának és a felhasználási szokásoknak a folyamatos figyelemmel kísérését. Ez utóbbi információ a karbantartás, a felújítás és újragyártás, illetve a termék modelljének későbbi fejlesztése során hasznosítható.

Bár a megosztásos gazdaság modellje paradigmaticus változásként értelmezhető, az e változás átütő erejével kapcsolatos kételyeket nem sikerült érdemben cáfolni. Az ellenérvek egy része hasonló az első csoportba sorolt tanulmányok áttekintésében említett kritikákhoz: a kedvező környezeti hatás mértéke nehezen számszerűsíthető, illetve a technológiaoptimisták nem számolnak a Jevons-paradoxonból fakadó pótlólagos környezeti terheléssel.²⁸

Az áttekintett tanulmányok között két további ellenérv szerepel. Egyrészt, a társadalmi-kulturális változások lassan terjednek el, ha egyáltalán – *Pakusch és szerzőtársai* [2018] például bemutatták, hogy a gépkocsimegosztás jelenleg leginkább a tömegközlekedés és nem a gépkocsi-tulajdonlás alternatíváját jelenti Németországban –, másrészt nagy az esély, hogy a megosztásos gazdaság üzleti modelljét a vállalatok piaci terjeszkedésre, pótlólagos kereslet generálására használják, a fenntarthatóság valódi javulására nem kerül sor (*Martin* [2016]).

Ez utóbbi ellenérv az ökológiai közgazdaságtan képviselőinek általános megközelítését tükrözi: az üzleti motivációkat *szembeállítják* a fenntarthatósággal (*Viitanen-Kingston* [2014]). Megfelelő szabályozás esetén azonban a kettő nem ütközik: az áttekintett cikkek mindkét csoportja azt mutatja, a főként üzleti motivációval fejlesztett technológiai megoldások környezeti fenntarthatóságra gyakorolt hatása kedvező. A képet árnyalják ugyan az esetleg később érvényesülő kedvezőtlen technológiai mellékhatások (ez utóbbiak következtében elengedhetetlen a folyamatok figyelemmel kísérése és szabályozása), és nem feledkezhetünk el a nem jelentéktelen visszapattanó hatásról sem. Ugyanakkor elutasítani a technológiai fejlődésnek azt az irányát, amely minden korábbinál erőteljesebben szolgálja az ökológiai hatékonyság növekedését és

²⁷ *Tukker* [2015] például a mosodai szolgáltatások kapcsán említi, hogy a „közösségi” mosógépek energia- és vízfelhasználási mutatókkal mért hatékonysága akár 50 százalékkal is meghaladja az egyéni (családi) mosógépekét, és a bérelhető eszközök (például gépek) okozta környezeti terhelés is töredéke a tulajdonolt eszközökének.

²⁸ Ami a számszerűsítést illeti, a megosztásos gazdaság heterogenitása és folyamatos bővülése, diverzifikálódása következtében valóban nehezen megoldható. Az eddigi próbálkozások a gépkocsimegosztással és a felhőalapú számítástechnika (szoftver mint szolgáltatás) modelljével kapcsolatos környezeti terhek megtakarításának kiszámítását célozták (*Chen-Kockelman* [2016], *Di Salvo és szerzőtársai* [2017], *Frenken* [2017], *Kumar-Buyya* [2012], *Jung-Koo* [2018]). Bár a számok esetenként igen jelentős megtakarításról árulkodnak, a kutatók a visszapattanó hatás mértékét is erőteljesnek ítélik (erre vonatkozóan ma még nincsenek konkrét számítások).

gyakorol fenntarthatósági szempontból kedvező hatást a társadalmi technológiára is (*Bajmócy–Málovics* [2011]), pusztán a kedvező gazdasági hatásokra hivatkozva, vagy csupán azért, mert az üzleti szféra „vezeti a táncot” (*Archibugi* [2017]) – észszerűtlen technofóbiának minősíthető (*Kerschmer–Ehlers* [2016]).

Következtetések

A technológioptimista, illetve a szkeptikus és pesszimista álláspontok közeledését a digitális átalakulás sem hozta el: nincs egyetértés sem a változások horderejével, sem a pozitív és a negatív hatások középtávú egyenlegével kapcsolatban.

A kritika alapvetően rendszerjellegű: a digitális átalakulás nem változtatja meg a játékszabályokat, vagyis továbbra is az üzleti szempontok dominálnak. Mivel a digitális technológiák alkalmazásának célja nem elsősorban a környezeti terhek mérséklése, hanem az értékesítés növelése és a költségek csökkentése, továbbá az IPAT-egyenlet nem változott, sőt erőteljes visszapattanó hatások várhatók, a digitális átalakulás paradigmaticus változáshoz nem, legfeljebb fokozatos javuláshoz vezet(ett). Ha félre is tesszük a „mennyi az elégséges” (Factor X) kérdést, akkor is számolnunk kell azzal, hogy a fokozatos javulásnak erős fizikai korlátai vannak, a „végtelenségig” nem lehet a nyersanyag- és az energiahatékonyságot javítani.

Ezek erős ellenérvek a technológiai fejlődés környezeti fenntarthatósági hatásaival kapcsolatos túlzott optimizmussal szemben. Vegyük azonban figyelembe, hogy a rendszerszemléletű kritika komoly helyzeti előnyben van. Míg a technológioptimista megközelítések meghatározott konkrét megoldások kedvező környezeti hatásait elemzik, vagyis szükségképpen *részterületekre* vonatkoznak,²⁹ a pesszimista álláspont rendszerösszefüggésekre hivatkozva igyekszik cáfolni a feltételezést, hogy e hatások átütő erejűek lennének.

Vizsgáljuk meg tehát, hogy az optimista érvek rendszerbe illeszthetők-e! A fenntarthatóságot célzó műszaki-társadalmi átalakulás szakirodalma (lásd *Geels* [2011] áttekintését) megállapítja, hogy akkor következhet be valódi elmozdulás, az emberiség akkor kerülhet valóban közelebb a fenntarthatósági célkitűzés megvalósításához, ha több szinten (nem csupán egy technológiai részterületen) következik be változás, majd az egyes változások egymásra hatnak, együtt fejlődnek és alakítják át magát a fennálló rendszert. A műszaki fejlődés, vagyis új technológiák, megoldások megjelenése tehát nem elégséges: arra is szükség van, hogy változzanak a felhasználói szokások, új hálózati kapcsolatok keletkezzenek az értékláncokban, változzon a gazdaság szerkezete és a gazdaságpolitika, a szabályozás és az intézményrendszer, az infrastruktúra és a társadalom kultúrája.

Ami a tisztán műszaki jellegű változásokat illeti, kimondhatjuk, hogy a digitális technológiák általános, mindent átható jellegéből következően még soha nem volt ennyi részterület, ennyiféle üzleti és egyéb folyamat (14. lábjegyzet), amelyeknek

²⁹ Éppen ezért, ahogy e cikk említett lektora megjegyezte, helytelen a technológioptimista megközelítéseknek az a gyakorlata, amely a mikro- és makroszintet összeszámolva, mikroszintű megállapítások alapján von le rendszerszintű következtetéseket.

ökológiai hatékonysága a digitális technológiák segítségével erősödhet. E hatások összeadódhatnak, erősíthetik egymást,³⁰ így az ökológiai hatékonyság összességében minden korábbi erőfeszítésnél eredményesebben javulhat.

Ráadásul, messze nem csak az ökológiai hatékonyság korábbiaknál jóval erőteljesebb javulásáról van szó! A digitalizáció a környezeti fenntarthatóságot erősítő hagyományos megoldásokat sem hagyja érintetlenül, például a körforgásos gazdaság (*Pagoropoulos és szerzőtársai* [2017]) vagy a megújuló energiaforrások alkalmazásának technológiáit.³¹ A digitális átalakulás technológiáinak alkalmazásával a hagyományos ökoteknológiák fejlődése is felgyorsul, például a környezet állapotának megfigyelése és a károk azonnali jelzése kibernetikai rendszerekkel, sőt a környezeti károk *előrejelzése* (és megelőzése) prediktív analitikai megoldásokkal (*Arts és szerzőtársai* [2015], *Wang és szerzőtársai* [2015]). Digitális technológiákat alkalmaznak továbbá az energiatárolás problémáinak megoldását célzó kutatások eredményességének javítása érdekében (lásd például *Zhu és szerzőtársai* [2017] áttekintését a 3D nyomtatás technológiáinak alkalmazásáról). Ha az energiatárolás területén is áttörést lehetne elérni, a gazdasági növekedés, fejlődés és a környezeti terhelés közötti kapcsolat ereje valóban páratlan mértékben csökkenhetne.

Még egyetlen megjegyzés az ökológiai hatékonyságról: a digitális technológiák a termelésen kívül számos egyéb gazdasági-társadalmi folyamat ökológiai hatékonyságát is növelik. A 15. lábjegyzetben felsorolt területeken a digitalizáció intézményi, gazdaságpolitikai és infrastrukturális változásokat indít(ott) el, ami társadalmi-kulturális változásoknak is a kiindulópontja lehet.

E kisebb-nagyobb *fokozatos* változásokat kiegészítik az előző alfejezetben bemutatott gazdasági, társadalmi, földrajzi és kulturális új fejlemények. Bár ez utóbbi – talán túlzással –, paradigmaticusnak nevezett változások egyike-másika ma még kezdeti stádiumban van, és az új fejlemények még nem alkotnak összefüggő komplex rendszert, azt egyértelműen állíthatjuk, hogy a változások több szinten jelentkeznek, sőt az egyes szintek kölcsönhatásba lépnek egymással, együtt fejlődnek és alakíthatják át a fennálló rendszert. El kell ismernünk azonban, hogy a rendszer átalakításának mértéke és a változás sebessége ma még nem belátható: e folyamatok nem lineárisak, felgyorsulhatnak, megtorpanhatnak, vagy akár visszajukra is fordulhatnak.

Amit még biztossággal állíthatunk, hogy a digitális átalakulásnak a környezeti fenntarthatóságra gyakorolt közvetlen és közvetett kedvező hatásai összességükben nem csupán kompenzálják, de – a visszapattanó hatás mértékétől függően – akár felül is múlhatják a kedvezőtlen környezeti hatásokat (lásd *Bieser–Hilty* [2018] áttekintését néhány erre vonatkozó számítás eredményeiről).

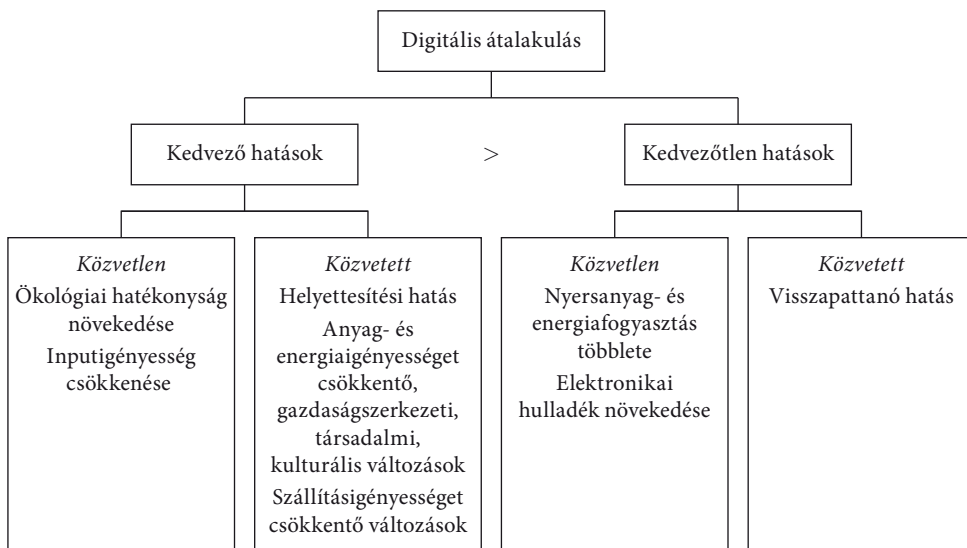
E technológioptimista megközelítést és a tanulmányban bemutatott érveket az 1. ábra foglalja össze.

³⁰ Az egyes megoldások elterjedésének függvényében változnak a „jó gyakorlat” standardjai, szigorodnak a műszaki normák, és ehhez kapcsolódóan a szabályozás is.

³¹ *Szalavetz* [2018] a feldolgozóipari energiaszükséglet megújuló energiaforrásokból történő fedezésének műszaki-gazdasági feltételeivel foglalkozik. Megállapítja, hogy a digitális megoldások segítségével mind az energiarendszer, mind az -felhasználás rugalmassága erősíthető, ami elengedhetetlen a megújuló energiaforrások jelenleginél nagyobb arányú és kiterjedtebb (például feldolgozóipari) felhasználásához.

1. ábra

A digitális átalakulás fenntarthatósági hatásai



Forrás: saját szerkesztés.

Ezzel együtt, Perez [2015] „globális zöld aranykora” akkor is túlzásnak tekinthető, ha egy gondolat kísérlet erejéig azt tételezzük fel, hogy a globális gazdaság a fejlett és környezettudatos országok körére szűkíthető. Az áttekintett szakirodalom alapján még ezzel a megszorítással sem állíthatjuk, hogy a fenntarthatóság belátható közelségbe került – de azt igen, hogy az új technológiák segítségével nagyobbat léptünk előre, mint valaha, e változó, fejlődő tartalmú célkitűzés megvalósításában.

Hivatkozások

- ACQUIER, A.–DAUDIGEOS, T.–PINKSE, J. [2017]: Promises and paradoxes of the sharing economy: An organizing framework. *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 125. 1–10. o. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.07.006>.
- ALCOTT, B. [2005]: Jevons' paradox. *Ecological Economics*, Vol. 54. No. 1. 9–21. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.020>.
- ANDRAE, A. S.–EDLER, T. [2015]: On global electricity usage of communication technology. *Trends to 2030. Challenges*, Vol. 6. No. 1. 117–157. o. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>.
- ANWAR, S.–GHAFFAR, M.–RAZZAQ, F.–BIBI, B. [2018]: E-waste Reduction via Virtualization in Green Computing. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, Vol. 41. No. 1. 1–11. o.
- ARCHIBUGI, D. [2017]: The social imagination needed for an innovation-led recovery. *Research Policy*, Vol. 46. No. 3. 55–556. o. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.09.018>.
- ARDOLINO, M.–RAPACCINI, M.–SACCANI, N.–GAIARDELLI, P.–CRESPI, G.–RUGGERI, C. [2018]: The role of digital technologies for the service transformation of industrial companies. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 6. 2116–2132. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1324224>.

- ARNFALK, P.–PILEROT, U.–SCHILLANDER, P.–GRÖNVALL, P. [2016]: Green IT in practice. Virtual meetings in Swedish public agencies. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 123. 101–112. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.063>.
- ARSHAD, R.–ZAHOR, S.–SHAH, M. A.–WAHID, A.–YU, H. [2017]: Green IoT. An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond. *IEEE Access*, Vol. 5. 15667–15681. o. <https://doi.org/10.1109/access.2017.2686092>.
- ARTS, K.–VAN DER WAL, R.–ADAMS, W. M. [2015]: Digital technology and the conservation of nature. *Ambio*, Vol. 44. No. 4. 661–673. o. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0705-1>.
- BAJMÓCY ZOLTÁN–MÁLOVICS GYÖRGY [2011]: Az ökológiai hatékonyságot növelő innovációk hatása a fenntarthatóságra. *Közgazdasági Szemle*, 58. évf. 10. sz. 890–904. o.
- BANERJEE, S. B. [2003]: Who sustains whose development? Sustainable development and the reinvention of nature. *Organization Studies*, Vol. 24. No. 1. 143–180. o. <https://doi.org/10.1177/0170840603024001341>.
- BAUMERS, M.–TUCK, C.–WILDMAN, R.–ASHCROFT, I.–HAGUE, R. [2017]: Shape complexity and process energy consumption in electron beam melting. A case of something for nothing in additive manufacturing? *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21. No. S1. 157–167. o. <https://doi.org/10.1111/jiec.12397>.
- BEHRENDT, A.–MÜLLER, N.–ODENWÄLDER, P.–SCHMITZ, C. [2017]: Industry 4.0 demystified–lean’s next level. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/industry-4-0-demystified-leans-next-level>.
- BERMAN, B. [2012]: 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, Vol. 55. No. 2. 155–162. o. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- BIESER, J. C. T.–HILTY, L. M. [2018]: Indirect Effects of the Digital Transformation on Environmental Sustainability: Methodological Challenges in Assessing the Greenhouse Gas Abatement Potential of ICT. Megjelent: *Penzenstadler, B.–Easterbrook, S.–Venters, C.–Ahmed, S. I.* (szerk.): *ICT4S2018. 5th International Conference on Information and Communication Technology for Sustainability*, Vol. 52. 68–81. o. <https://doi.org/10.29007/lx7q>.
- BLEISCHWITZ, R.–MIEDZINSKI, M. [2018]: The Resource Nexus and Resource Efficiency: What a Nexus Perspective Adds to the Story. Megjelent: *Lehmann, H.* (szerk.): *Factor X. Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources*. Springer, Cham, 199–212. o. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50079-9_12.
- BRENNAN, L.–FERDOWS, K.–GODSELL, J.–GOLINI, R.–KEEGAN, R.–KINKEL, S.–SRAI, J. S.–TAYLOR, M. [2015]: Manufacturing in the world: Where next? *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 35. No. 9. 253–274. o. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-03-2015-0135>.
- BRESSANELLI, G.–ADRODEGARI, F.–PERONA, M.–SACCANI, N. [2018]: Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies. *Sustainability*, Vol. 10. No. 3. 639–660. o. <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
- BUER, S. V.–STRANDHAGEN, J. O.–CHAN, F. T. [2018]: The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 8. 2924–2940. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442945>.
- CHEN, T. D.–KOCKELMAN, K. M. [2016]: Carsharing’s life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions. *Transportation Research, Part D. Transport and Environment*, Vol. 47. 276–284. o. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.012>.
- CHERTOW, M. R. [2000]: The IPAT equation and its variants. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 4. No. 4. 13–29. o. <https://doi.org/10.1162/10881980052541927>.

- COLLEDANI, M.–TOLIO, T.–FISCHER, A.–JUNG, B.–LANZA, G.–SCHMITT, R.–VÁNCZA JÓZSEF [2014]: Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 63. No. 2. 773–796. o. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.002>.
- COMMONER, B. [1972]: *The Environmental Cost of Economic Growth*. Megjelent: *Ridker, R. G.* (szerk.): *Population, Resources and the Environment*. Government Printing Office, Washington, DC, 339–363. o.
- COREYNEN, W.–MATTHYSSENS, P.–VAN BOCKHAVEN, W. [2017]: Boosting servitization through digitization: Pathways and dynamic resource configurations for manufacturers. *Industrial Marketing Management*, Vol. 60. 42–53. o. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.04.012>.
- CORRADO, C.–HASKEL, J.–JONA-LASINIO, C.–IOMMI, M. [2012]: *Intangible Capital and Growth in Advanced Economies: Measurement Methods and Comparative Results*. <http://www.intan-invest.net>.
- CORRADO, C.–HASKEL, J.–JONA-LASINIO, C.–IOMMI, M. [2013]: Innovation and intangible investment in Europe, Japan, and the United States. *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 29. No. 2. 261–286. o. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grt017>.
- DACHS, B.–KINKEL, S.–JÄGER, A. [2017]: Bringing it all back home? Backshoring of manufacturing activities and the adoption of Industry 4.0 technologies. MPRA Paper, No. 83167.
- DAHMS, J. B. [2014]: Can efficiency improvements reduce resource consumption? *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18. No. 6. 883–897. o. <https://doi.org/10.1111/jiec.12110>.
- DAHL, M.–ALBO, A.–ERIKSSON, J.–PETTERSSON, J.–FALKMAN, P. [2017]: Virtual reality commissioning in production systems preparation. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1–7. o. IEEE. <https://doi.org/10.1109/etfa.2017.8247581>.
- DAVIS, L. W.–FUCHS, A.–GERTLER, P. [2014]: Cash for coolers: Evaluating a large-scale appliance replacement program in Mexico. *American Economic Journal: Economic Policy*, Vol. 6. No. 4. 207–238. o. <https://doi.org/10.1257/pol.6.4.207>.
- DI SALVO, A. L.–AGOSTINHO, F.–ALMEIDA, C. M.–GIANNETTI, B. F. [2017]: Can cloud computing be labeled as “green”? Insights under an environmental accounting perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69. 514–526. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.153>.
- DIAMANDIS, P. H.–KOTLER, S. [2012]: *Abundance: The future is better than you think*. Free Press, New York.
- DINDA, S. [2004]: Environmental Kuznets curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, Vol. 49. No. 4. 431–455. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>.
- DOMBI JUDIT–MÁLOVICS GYÖRGY [2015]: A növekedésen túl – egy új irányzat hozzájárulása a fenntarthatósági vitához. *Közgazdasági Szemle*, 62. évf. 2. sz. 200–221. o.
- DOSI, G. [1982]: Technological paradigms and technological trajectories. A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. *Research Policy*, Vol. 11. No. 3. 147–162. o. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(82\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0048-7333(82)90016-6).
- DUFLOU, J. R.–SUTHERLAND, J. W.–DORNFELD, D.–HERRMANN, C.–JESWIET, J.–HAUSCHIED, M.–KARA, S.–KELLENS, K. [2012]: Towards energy and resource efficient manufacturing. A processes and systems approach. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 61. No. 2. 587–609. o. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002>.
- ECKHOUSE, B. [2017]: Amazon Battles Google for Renewable Energy Crown. Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-19/bezos-christens-wind-farm-as-us-companies-buy-more-clean-power>.
- EHRlich, P.–HOLDREN, J. [1972]: *Impact of population growth*. Megjelent: *Ridker, R. G.* (szerk.): *Population, Resources, and the Environment*. U. S. Government Printing Office, Washington, DC, 365–377. o.

- ELKINGTON, J. [1997]: *Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business*. Capstone Publishing, Oxford.
- FICHTER, K.–HINTEMANN, R. [2014]: Beyond Energy: The Quantities of Materials Present in the Equipment of Data Centers. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 18. No. 6. 846–858. o. <https://doi.org/10.1111/jiec.12155>.
- FORD, S.–DESPEISSE, M. [2016]: Additive manufacturing and sustainability. An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 137. 1573–1587. o.
- FRENKEN, K. [2017]: Political economies and environmental futures for the sharing economy. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A*, Vol. 375. No. 2095. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0367>.
- GALVIN, R. [2015]: The ICT/electronics question: Structural change and the rebound effect. *Ecological Economics*, Vol. 120. 23–31. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.08.020>.
- GEBLER, M.–UITERKAMP, A. J. S.–VISSER, C. [2014]: A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, Vol. 74. 158–167. o. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>.
- GEELS, F. W. [2011]: The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 1. No. 1. 24–40. o. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>.
- GÓMEZ-PASTORA, J.–BRINGAS, E.–ORTIZ, I. [2014]: Recent progress and future challenges on the use of high performance magnetic nano-adsorbents in environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, Vol. 256. 187–204. o. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.06.119>.
- GOSSART, C. [2015]: Rebound effects and ICT. A review of the literature. Megjelenet: *Hilty–Aebischer* [2015] 435–448. o. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_26.
- GROSSMAN, G. M.–KRUEGER, A. B. [1995]: Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 110. No. 2. 353–377. o. <https://doi.org/10.2307/2118443>.
- HAQUE, N.–HUGHES, A.–LIM, S.–VERNON, C. [2014]: Rare earth elements: Overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources*, Vol. 3. No. 4. 614–635. o. <https://doi.org/10.3390/resources3040614>.
- HAZAS, M.–MORLEY, J.–BATES, O.–FRIDAY, A. [2016]: Are there limits to growth in data traffic? On time use, data generation and speed. In *Proceedings of the second workshop on computing within limits*. ACM. <https://doi.org/10.1145/2926676.2926690>.
- HERRMANN, C.–SCHMIDT, C.–KURLE, D.–BLUME, S.–THIEDE, S. [2014]: Sustainability in manufacturing and factories of the future. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 1. No. 4. 283–292. o. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0034-z>.
- HILTY, L. M.–AEBISCHER, B. (szerk.) [2015]: *ICT innovations for sustainability*. Springer, Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7>.
- HINTEMANN, R.–BEUCKER, S.–CLAUSEN, J.–STOBBE, L.–PROSKE, M.–NISSEN, N. F. [2016]: Energy efficiency of data centers. A system-oriented analysis of current development trends. *Electronics Goes Green 2016+*, <https://doi.org/10.1109/egg.2016.7829805>.
- HOLM, S. O.–ENGLUND, G. [2009]: Increased eco-efficiency and gross rebound effect: Evidence from USA and six European countries 1960–2002. *Ecological Economics*, Vol. 68. No. 3. 879–887. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.07.006>.
- JUNG, J.–KOO, Y. [2018]: Analyzing the Effects of Car Sharing Services on the Reduction of Greenhouse Gas (GHG) Emissions. *Sustainability*, Vol. 10. No. 2. 539–556. o. <https://doi.org/10.3390/su10020539>.

- KEMP, R.–OLTRA, V. [2011]: Research insights and challenges on eco-innovation dynamics. *Industry and Innovation*, Vol. 18. No. 3. 249–253. o. <https://doi.org/10.1080/13662716.2011.562399>.
- KEREKES SÁNDOR [2006]: A fenntartható fejlődés közgazdasági értelmezése. Megjelent: *Bulla Miklós–Tamás Pál* (szerk.): Fenntartható fejlődés Magyarországon. Jövőképek és forgatókönyvek. Új Mandátum Kiadó, Budapest, 196–211. o.
- KEREKES SÁNDOR [2012]: A fenntartható fejlődésről válság idején. Megjelent: *Kerekes Sándor–Jámbor Imre* (szerk.): Fenntartható fejlődés, élhető régió, élhető települési táj, 1. Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest, 15–36. o.
- KERSCHNER, C.–EHLERS, M. H. [2016]: A framework of attitudes towards technology in theory and practice. *Ecological Economics*, Vol. 126. 139–151. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.02.010>.
- KIEL, D.–MÜLLER, J. M.–ARNOLD, C.–VOIGT, K. I. [2017]: Sustainable Industrial Value Creation. Benefits and Challenges of Industry 4.0. *International Journal of Innovation Management*, Vol. 21. No. 8. 1–21. o. <https://doi.org/10.1142/s1363919617400151>.
- KLAINE, S. J.–KOELMANS, A. A.–HORNE, N.–CARLEY, S.–HANDY, R. D.–KAPUSTKA, L.–NOWACK, B.–VON DER KAMMER, F. [2012]: Paradigms to assess the environmental impact of manufactured nanomaterials. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 31. No. 1. 3–14. o. <https://doi.org/10.1002/etc.733>.
- KOCSIS TAMÁS [2010]: Hajózni muszáj! A GDP, az ökológiai lábnyom és a szubjektív jóllét stratégiai összefüggései. *Közgazdasági Szemle*, 57. évf. 6. sz. 536–554. o.
- KRIPPENDORFF, K. [2004]: Content Analysis. An Introduction to its Methodology. 2. kiadás. Sage Publications, Thousand Oaks.
- KUMAR, S.–BUYA, R. [2012]: Green cloud computing and environmental sustainability. Megjelent: *Murugesan, S.–Gangadheran, G. R.* (szerk.): *Harnessing Green IT: Principles and Practices*. IEEE and Wiley, Melbourne, 315–340. o. <https://doi.org/10.1002/9781118305393.ch16>.
- KURZWEIL, R. [2005]: *The Singularity Is Near*. Viking Penguin Group, New York.
- KUSIAK, A. [2018]: Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 1–2. 508–517. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>.
- MAHUT, F.–DAABOUL, J.–BRICOGNE, M.–EYNARD, B. [2017]: Product-Service Systems for servitization of the automotive industry: A literature review. *International Journal of Production Research*, Vol. 55. No. 7. 2102–2120. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1252864>.
- MÁLOVICS GYÖRGY–BAJMÓCY ZOLTÁN [2009]: A fenntarthatóság közgazdaságtani értelmezései. *Közgazdasági Szemle*, 56. évf. 5. sz. 464–483. o.
- MARTIN, C. J. [2016]: The sharing economy: A pathway to sustainability or a nightmarish form of neoliberal capitalism? *Ecological Economics*, Vol. 121. 149–159. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.11.027>.
- MATSUDA, M.–KIMURA, F. [2015]: Usage of a digital eco-factory for sustainable manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 9. 97–106. o. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.12.003>.
- MCLELLAN, B. C.–CORDER, G. D.–ALI, S. H. [2013]: Sustainability of rare earths. An overview of the state of knowledge. *Minerals*, Vol. 3. No. 3. 304–317. o. <https://doi.org/10.3390/min3030304>.
- MCMAHON, J. E.–PRICE, S. K. [2011]: Water and energy interactions. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 36. 163–191. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-061110-103827>.
- MEADOWS, D. H.–RANDERS, J.–BEHRENS III, W. W. [1972]: *The Limits to Growth: A Report to the Club of Rome*. Universe Books, New York.

- MELVILLE, N. P. [2012]: Information Systems, Business, and the Natural Environment. Can Digital Business Transform Environmental Sustainability? Megjelent: *Bansal, P.–Hoffman, A. J.* (szerk.): *The Oxford Handbook of Business and the Natural Environment*. Oxford Handbook Online. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199584451.003.0018>.
- MOLDAVSKA, A.–WELO, T. [2017]: The concept of sustainable manufacturing and its definitions. A content-analysis based literature review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 166. 744–755. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.006>.
- MONOSTORI LÁSZLÓ–KÁDÁR BOTOND–BAUERNHANSL, T.–KONDOH, S.–KUMARA, S.–REINHART, G.–SAUER, O.–SCHUH, G.–SIHN, W.–UEDA, K. [2016]: Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 65. No. 2. 621–641. o. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>.
- MONTIEL, I.–DELGADO-CEBALLOS, J. [2014]: Defining and measuring corporate sustainability. Are we there yet? *Organization and Environment*, Vol. 27. No. 2. 113–139. o. <https://doi.org/10.1177/1086026614526413>.
- MRUGALSKA, B.–WYRWICKA, M. K. [2017]: Towards lean production in industry 4.0. *Procedia Engineering*, Vol. 182. 466–473. o. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.135>.
- MÜLLER, J. M.–KIEL, D.–VOIGT, K. I. [2018]: What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability. *Sustainability*, Vol. 10. No. 1. 247–270. o. <https://doi.org/10.3390/su10010247>.
- OECD [2011]: *Towards green growth. A summary for policy makers*. <https://www.oecd.org/greengrowth/48012345.pdf>.
- PAGOROPOULOS, A.–PIGOSSO, D. C.–MCALOONE, T. C. [2017]: The emergent role of digital technologies in the Circular Economy: A review. *Procedia CIRP*, Vol. 64. 19–24. o. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>.
- PAKUSCH, C.–STEVENS, G.–BOSSAUER, P. [2018]: Shared Autonomous Vehicles: Potentials for a Sustainable Mobility and Risks of Unintended Effects. *EPiC Series in Computing*, Vol. 52. 259–269. o. <https://doi.org/10.29007/rg73>.
- PEREZ, C. [2015]: Capitalism, Technology and a Green Global Golden Age: The Role of History in Helping to Shape the Future. *The Political Quarterly*, Vol. 86. No. S1. 191–217. o. <https://doi.org/10.1111/1467-923x.12240>.
- PETRIDES, D.–PAPACHARALAMPOPOULOS, A.–STAVROPOULOS, P.–CHRYSSOLOURIS, G. [2018]: Dematerialization and Environmental Sustainability: Challenges and Rebound Effects. *Procedia CIRP*, Vol. 72. 845–849. o. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.131>.
- PIHKOLA, H.–HONGISTO, M.–APILO, O.–LASANEN, M.–VATANEN, S. [2018]: Energy consumption of mobile data transfer—Increasing or decreasing? Evaluating the impact of technology development & user behavior. <https://easychair.org/publications/paper/GHs3>. <https://doi.org/10.29007/ddrc>.
- RAUCH, E.–DALASEGA, P.–MATT, D. T. [2016]: Sustainable production in emerging markets through Distributed Manufacturing Systems (DMS). *Journal of Cleaner Production*, Vol. 135. 127–138. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.106>.
- REIJNDERS, L. [1998]: The factor X debate. Setting targets for eco-efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 2. No. 1. 13–22. o. <https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.1.13>.
- RIFKIN, J. [2011]: *The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world*. Palgrave, Macmillan, London.
- ROCKSTRÖM, J.–STEFFEN, W.–NOONE, K.–PERSSON, Å.–CHAPIN III, F. S.–LAMBIN, E.–NYKVIST, B. [2009]: Planetary boundaries. Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, Vol. 14. No. 2. 1–32. o. <https://doi.org/10.5751/es-03180-140232>.

- ROSEN, R.–VON WICHERT, G.–LO, G.–BETTENHAUSEN, K. D. [2015]: About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48. No. 3. 567–572. o. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>.
- SARKIS, J.–ZHU, Q. [2018]: Environmental sustainability and production: Taking the road less travelled. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 1. 743–759. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1365182>.
- SCHALTEGGER, S.–LÜDEKE-FREUND, F.–HANSEN, E. G. [2012]: Business cases for sustainability: The role of business model innovation for corporate sustainability. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, Vol. 6. No. 2. 95–119. o. <https://doi.org/10.1504/ijisd.2012.046944>.
- SCHANDL, H.–HATFIELD-DODDS, S.–WIEDMANN, T.–GESCHKE, A.–CAI, Y.–WEST, J.–NEWT, D.–BAYNES, T.–LENZEN, M.–OWEN, A. [2016]: Decoupling global environmental pressure and economic growth: Scenarios for energy use, materials use and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 132. 45–56. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.100>.
- SCHMIDT-BLEEK, F. [1993]: The Factor 10/MIPS-Concept: Bridging Ecological, Economic, and Social Dimensions with Sustainability Indicators. Factor 10 Club, http://archive.unu.edu/zef/publications_e/ZEF_EN_1999_03_D.pdf.
- SETO, K. C.–DAVIS, S. J.–MITCHELL, R. B.–STOKES, E. C.–UNRUH, G.–ÜRGE-VORSATZ DIÁNA [2016]: Carbon lock-in: Types, causes, and policy implications. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 41. 425–452. o. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085934>.
- SHAH, R.–WARD, P. T. [2003]: Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance. *Journal of Operations Management*, Vol. 21. No. 2. 129–149. o. [https://doi.org/10.1016/s0272-6963\(02\)00108-0](https://doi.org/10.1016/s0272-6963(02)00108-0).
- STERN, D. I. [2004]: The rise and fall of the environmental Kuznets curve. *World Development*, Vol. 32. No. 8. 1419–1439. o. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2004.03.004>.
- STOCK, T.–SELIGER, G. [2016]: Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia CIRP*, Vol. 40. 536–541. o. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>.
- SZALAVETZ ANDREA [2013]: Régi-új világgazdasági jelenségek a globális értékláncok tükrében. *Külgazdaság*, 57. évf. 3–4. sz. 46–64. o.
- SZALAVETZ ANDREA [2017]: Ipar 4.0 technológiák és környezeti fenntarthatóság – magyar feldolgozóipari tapasztalatok. *Külgazdaság*, 61. évf. 7–8. sz. 28–45. o.
- SZALAVETZ ANDREA [2018]: Úton az energiahatékonyságtól az energiarugalmasságig. Magyarországi iparvállalatok tapasztalatai. *Vezetéstudomány*, 49. évf. 6. sz. 13–21. o. <https://doi.org/10.14267/veztud.2018.06.02>.
- SZANYI MIKLÓS [2018]: Műszaki fejlődés és hosszú távú gazdasági ciklusok. *MTA KRTK VGI Műhelytanulmányok*, 122. sz. http://real.mtak.hu/73143/1/MT_122_Szanyi.pdf.
- SZIGETI CECÍLIA–TÓTH GERGELY–SZABÓ DÁNIEL RÓBERT [2017]: Decoupling – shifts in ecological footprint intensity of nations in the last decade. *Ecological Indicators*, Vol. 72. 111–117. o. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.034>.
- TUKKER, A. [2015]: Product services for a resource-efficient and circular economy—a review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 97. 76–91. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049>.
- UNEP [2011]: Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth. United Nations Environment Programme. http://www.gci.org.uk/Documents/Decoupling_Report_English.pdf.
- UNEP [2016]: Resource efficiency: Potential and economic implications. United Nations Environment Programme. A report of the International Resource Panel. <http://www>.

- resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/resource_efficiency_report_march_2017_web_res.pdf.
- UNRUH, G. C. [2000]: Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, Vol. 28. No. 12. 817–830. o. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(00)00070-7).
- VAN DEN BERGH, J.–FOLKE, C.–POLASKY, S.–SCHEFFER, M.–STEFFEN, W. [2015]: What if solar energy becomes really cheap? A thought experiment on environmental problem shifting. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 14. 170–179. o. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.05.007>.
- VANDERMERWE, S.–RADA, J. [1988]: Servitization of business: Adding value by adding services. *European Management Journal*, Vol. 6. No. 4. 314–324. o. [https://doi.org/10.1016/0263-2373\(88\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0263-2373(88)90033-3).
- VENDRELL-HERRERO, F.–WILSON, J. R. [2017]: Servitization for territorial competitiveness. Taxonomy and research agenda. *Competitiveness Review. An International Business Journal*, Vol. 27. No. 1. 2–11. o. <https://doi.org/10.1108/cr-02-2016-0005>.
- VIITANEN, J.–KINGSTON, R. [2014]: Smart cities and green growth: Outsourcing democratic and environmental resilience to the global technology sector. *Environment and Planning A*, Vol. 46. No. 4. 803–819. o. <https://doi.org/10.1068/a46242>.
- VIVANCO, D. F.–KEMP, R.–VAN DER VOET, E. [2015]: The relativity of eco-innovation: Environmental rebound effects from past transport innovations in Europe. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 101. 71–85. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.019>.
- VON WEIZSÄCKER, E. U.–LOVINS, A. B.–LOVINS, L. H. [1997]: Factor four: Doubling wealth-halving resource use. *The New Report to the Club of Rome*. Earthscan, London.
- VON WEIZSÄCKER, E. U.–WIJKMAN, A. [2018]: Come On! Capitalism, short-termism, Population, and the Destruction of the Planet. A Report prepared for the Club of Rome's 50th Anniversary. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7419-1>.
- WANG, Z.–SONG, H.–WATKINS, D. W.–ONG, K. G.–XUE, P.–YANG, Q.–SHI, X. [2015]: Cyber-physical systems for water sustainability: Challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53. No. 5. 216–222. o. <https://doi.org/10.1109/mcom.2015.7105668>.
- WCED [1987]: Our common future: World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford.
- WIEDMANN, T. O.–SCHANDL, H.–LENZEN, M.–MORAN, D.–SUH, S.–WEST, J.–KANEMOTO, K. [2013]: The material footprint of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 112. No. 20. 6271–6276. o. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220362110>.
- XU, L. D.–XU, E. L.–LI, L. [2018]: Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, Vol. 56. No. 8. 2941–2962. o. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.
- YORK, R.–ROSA, E. A.–DIETZ, T. [2003]: STIRPAT, IPAT and ImpACT. Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts. *Ecological Economics*, Vol. 46. No. 3. 351–365. o. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(03\)00188-5](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(03)00188-5).
- ZHU, C.–LIU, T.–QIAN, F.–CHEN, W.–CHANDRASEKARAN, S.–YAO, B.–SONG, Y.–DUOSS, E. B.–KUNTZ, J. D.–SPADACCINI, C. M.–WORSLEY, M. A.–LI, Y. [2017]: 3D printed functional nanomaterials for electrochemical energy storage. *Nano Today*, Vol. 15. 107–120. o. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2017.06.007>.
- ZHUANG, C.–LIU, J.–XIONG, H. [2018]: Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96. No. 1–4. 1149–1163. o. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>.