

ENERGIABEFECTETÉS-ENERGIAHOZAM ARÁNY: A MEGÚJULÓ ÉS FOSSZILIS ENERGIAFORRÁSOK HATÉKONYSÁGÁNAK ÉS FENNTARTHATÓSÁGÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

ENERGY RETURN ON INVESTMENT: A COMPARISON OF THE EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY AND FOSSIL FUELS

Zsiborács Henrik¹, Hegedűsné Baranyai Nóra², Vincze András³

¹PhD, tudományos munkatárs, Pannon Egyetem Nagykanizsa Körforgásos Gazdaság Egyetemi Központ Megújuló Energiaforrások
Kutatócsoport, Nagykanizsa

zsiboracs.henrik@pen.uni-pannon.hu

²PhD, habil., egyetemi docens, Pannon Egyetem Nagykanizsa Körforgásos Gazdaság Egyetemi Központ Megújuló Energiaforrások
Kutatócsoport, Nagykanizsa

baranyai.nora@pen.uni-pannon.hu

³PhD, tudományos munkatárs, Pannon Egyetem Nagykanizsa Körforgásos Gazdaság Egyetemi Központ Megújuló Energiaforrások
Kutatócsoport, Nagykanizsa

vincze.andras@pen.uni-pannon.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban az energiaigény folyamatos növekedése, a fosszilis tüzelőanyagok egyre korlátozottabb elérhetősége és az éghajlatváltozás kihívásai mind arra mutatnak rá, hogy a fenntartható energiatermelés és az energiahordozók hatékony felhasználása létfontosságú a jövő generációi számára. Az *Energy Return on Investment* (EROI), vagyis az energia befektetésének hozama, az energiatermelés hatékonyságával és fenntarthatóságával kapcsolatos mérőszám, amely azt méri, hogy egy adott energiaforrásba vagy technológiába fektetett egységnyi energia mennyi hasznosítható energiát eredményez. A mutató lehetővé teszi az energiatermelés különböző módszereinek és forrásainak értékelését. A kutatás három EROI számítási típust mutat be a fosszilis és a megújuló energiaforrások vonatkozásában, annak érdekében, hogy különböző aspektusból összehasonlítsa az energiabefektetés-energiahozam arányukat. Jelen kutatás célja a nemzetközi szakirodalomban fellelhető EROI-adatok felkutatása, aktualizálása és egymással való összevetése. Mivel az energiahatékonysági mutatók évről évre változnak, az aktuális adatok nélkülözhetetlenek ahhoz, hogy naprakész értékelések szülessenek az energiaforrások fenntarthatóságáról és hatékonyságáról.

ABSTRACT

Today's ever-increasing demand for energy, the increasingly limited availability of fossil fuels and the challenges of climate change all point to the vital importance of sustainable energy production and efficient use of energy resources for future generations. The Energy Return

on Investment (EROI) is a measure of the efficiency and sustainability of energy production, measuring how much usable energy is produced per unit of energy invested in a given energy source or technology. The indicator allows an assessment of different methods and sources of energy production. The research presents three types of EROI calculations for fossil fuels and renewable energy sources, in order to compare their energy-investment-return ratios from different aspects. The aim of the present research is to search for, update, and compare EROI data available in the international literature. As energy efficiency indicators change from year to year, current data are essential to provide an up-to-date assessment of the sustainability and efficiency of energy sources.

Kulcsszavak: Energy Return on Investment (EROI), fosszilis energiahordozók, megújuló energiaforrások, fenntarthatóság

Keywords: Energy Return on Investment (EROI), fossil fuels, renewable energy sources, sustainability

BEVEZETÉS

Az energiaátmenettel kapcsolatos viták és döntések kiemelt jelentőséggel bírnak a gazdasági versenyképesség, az innováció ösztönzése és a munkahelyteremtés szempontjából is. Ezért az energiaátmenet kulcsfontosságú a globális fenntarthatóság és a gazdasági stabilitás szempontjából (Ciaccia, 2022; Ram et al., 2022). Az energiaszektor átalakítása során az egyik fontos mutatószám az EROI, azaz az energiabefektetés-energiahozam arány, amely lehetővé teszi a különböző energiaforrások és technológiák összehasonlítását, és segíti a döntéshozókat abban, hogy optimális energiastratégiákat alakítsanak ki a jövőbeli energiabiztonság és fenntarthatóság biztosítása érdekében. Az EROI egy dimenzió nélküli mutató. Értéke azt mutatja, hogy az adott energiaforrás vagy technológia mennyi többlet-energiát hoz létre a befektetett energiához képest. Amikor ez az érték 1 feletti, az azt jelenti, hogy az energiatermelés hatékonyabb és eredményesebb, mivel több hasznosítható energia jön létre az adott befektetett energiához képest. Amennyiben viszont az értéke kisebb mint 1, akkor az energiaforrás vagy technológia nem hatékony, mert kevesebb hasznosítható energia keletkezik, mint amennyit annak előállításához felhasználtak (Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020; Diesendorf–Wiedmann, 2020).

Jelen tanulmány a nemzetközi kutatások eredményeire épül, és központi célja az, hogy felkutassa a nemzetközi szakirodalomban található EROI-adatokat, és frissítse, valamint összevesse azokat annak érdekében, hogy a friss adatok birtokában aktuális, naprakész értékelések készülhessenek a különböző energiaforrások valós fenntarthatóságát és hatékonyságát illetően. Az elvégzett vizsgálat legfontosabb következtetése, hogy habár az EROI-mutatók hasznosak az energia-

hatékonysági és fenntarthatósági elemzésekben, a realitásokat jobban tükröző teljes képhez az externális költségek szisztematikus értékelése és figyelembevétele is elengedhetetlen.

EROI SZÁMÍTÁSI TÍPUSOK

Napjainkban a szakirodalom jellemzően három EROI-típust különböztet meg, ezek a következők (Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020; Diesendorf–Wiedmann, 2020):

- kezdeti befektetések alapján számított energiabefektetés-hozam arány, $EROI_{st}$ vagy $EROI_{PRIM}$;
- végső fogyasztói szinten mért energiabefektetés-energiáhozam arány, $EROI_{final}$ vagy $EROI_{FIN}$;
- kiterjesztett számításokon alapuló energiabefektetés-energiáhozam arány, $EROI_{ext}$.

Jelen kutatás Carlos De Castro és Iñigo Capellán-Pérez (2020) munkája alapján az $EROI_{st}$, az $EROI_{final}$, valamint az $EROI_{ext}$ jelöléseket használja.

Az első típus, az $EROI_{st}$ egy olyan mutatószám, amely az energiatermelés hatékonyságát és fenntarthatóságát jellemzi. Más megközelítésben, az energiabefektetés-energiáhozam arányt méri a primer energiafázisban, vagyis az energiaforrás kitermelésében, előállításában és feldolgozásában. Ez magában foglalja a nyersanyagok bányászatát, a fűrészeket, a finomítást és más kezdeti műveleteket. Kiszámítása során figyelembe veszik a kezdeti befektetéseket, amelyek az adott energiaforrás vagy technológia kiépítéséhez szükségesek. Ezek a befektetések magukban foglalják az anyagi erőforrásokat, a munkaerőt és az infrastruktúrát is. A kezdeti befektetések tartalmazzák például az építési költségeket, a berendezések beszerzését és az üzembe helyezést is. Az $EROI_{st}$ használata fontos szerepet játszik a befektetési döntések meghozatalában. Azonban fontos megemlíteni ennek a mutatónak a korlátait is:

- Először is csak a kezdeti befektetések alapján számol, és nem veszi figyelembe a teljes életciklust vagy a későbbi működési költségeket. Emiatt csupán részleges képet nyújt az energiabefektetés-energiáhozam arányról, és nem minden költséget és hatást vesz figyelembe. Figyelmen kívül hagyja például az energiaforrás üzemeltetéséhez szükséges folyamatos energiabefektetést vagy a környezeti hatásokat.
- Nem veszi figyelembe az energia minőségét vagy a hasznosítható energia típusát. Ez azt jelenti, hogy vannak olyan esetek, amikor a létrehozott energia nem használható fel a kívánt módon vagy a tervezett célokra. Például egy magas EROI-értékű energiaforrás esetén lehet, hogy a termelt energia

nem megfelelő minőségű, mennyiségű vagy jellegű ahhoz, hogy hatékonyan hasznosítható legyen a várt felhasználási területeken.

- Az energia előállításának hatékonyságát és az energia megtérülését méri, figyelmen kívül hagyva más fenntarthatósági szempontokat, például a környezeti hatásokat, a társadalmi-gazdasági tényezőket, azok értékelését vagy a természeti erőforrások kimerítését.
- A mutató nem minden esetben alkalmazható vagy hasonlítható össze a különböző energiaforrások és technológiák között. Az értékek számítása és értelmezése specifikus módszereket és becsléseket igényel, amelyek bizonyos esetekben lehetnek vitatottak vagy nehezen meghatározhatók (Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020; Diesendorf–Wiedmann, 2020).

A második típus, az $EROI_{final}$ olyan mutatószám, amely az energiatermelés hatékonyságára és fenntarthatóságára vonatkozik a végső fogyasztói szinten. Ez a mutató a teljes energiatermelési folyamat végén, az energia felhasználásának utolsó szakaszában méri az energiabefektetés-energiahozam arányát. Figyelembe veszi az energiaforrások előállítása, átalakítása és szállítása során történő energiafogyasztást, valamint az energiahordozók felhasználásával történő végfelhasználást. Ez utóbbi magában foglalja az energiát igénylő folyamatokat, például az ipari termelést, közlekedést, fűtést vagy a villamos energia felhasználását. Az $EROI_{final}$ kiszámításához az energia előállításával, felhasználhatóvá tételével és felhasználásával kapcsolatos adatokat és a végső fogyasztásban keletkező hasznos energia mennyiségét veszik figyelembe. Az $EROI_{final}$ több előnnyel is rendelkezik az $EROI_{st}$ -hez képest:

- A mutató a végső fogyasztói szinten mért energiabefektetés-energiahozam arányt vizsgálja. Ezáltal átfogóbb és részletesebb képet kaphatunk arról, hogy mennyi hasznos energia áll rendelkezésre az energiafelhasználás utolsó szakaszában. Míg az $EROI_{st}$ csak a primer energifázisban lévő befektetést és hozamot veszi figyelembe, addig az $EROI_{final}$ figyelembe veszi az összes energiafogyasztással járó folyamatot.
- A mutató a végső felhasználó szemszögéből értékelve mutatja meg, hogy mennyi hasznosítható energia áll rendelkezésre az adott energiahordozó vagy technológia által.
- A mutató segítségével azonosíthatók az alacsony hatékonyságú energiaforrások vagy technológiák, amelyek kevés hasznosítható energiát termelnek a befektetett energiához képest. Ez a mutató lehetővé teszi a fenntarthatóbb energiasztratégiák kidolgozását, mivel az alacsony $EROI_{final}$ -értékű energiaforrások hosszú távon kevésbé fenntarthatók, és nagyobb energiabefektetést igényelnek.
- A mutató megmutatja, hogy mennyire hatékonyan hasznosíthatók az egyes energiaforrások a végső felhasználó számára. Ez az információ segít a dön-

téshozóknak és az energiaipar szereplőinek a valósághoz közelebbi képet kapni arról, hogy az adott energiahordozó vagy technológia mennyi hasznos energiát képes biztosítani a tényleges felhasználók számára (Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán–Perez, 2020; Diesendorf–Wiedmann, 2020).

A vizsgált mutatószám harmadik fajtája az $EROI_{ext}$, a kiterjesztett számításokon alapuló energiabefektetés-energiáhozam arány, amely a megújuló és a meg nem újuló energiaforrások által generált energia hatékonyságát értékeli a teljes rendszer szempontjából. Az $EROI_{ext}$ az EROI koncepciójának továbbfejlesztése, amely elsősorban az energiaforrások felhasználásával kapcsolatos költségeket és hatékonyságot vizsgálja, de más szempontokat is figyelembe vehet, attól függően, hogy milyen meghatározását használják, és milyen kiterjedésben alkalmazzák. Az $EROI_{ext}$ esetén figyelembe veszik az energiaforrás kitermelését, feldolgozását, szállítását, valamint az energetikai infrastruktúra kiépítését és fenntartását. Ez magában foglalja a beruházásokhoz kapcsolódó energetikai költségeket is, mint például az új erőművek, hálózatok és átviteli vonalak építése és karbantartása. Az értéke azt mutatja, hogy egy adott energiaforrás mennyi hasznos energia termelésére képes a társadalom számára, figyelembe véve az összes energetikai befektetést, amely a teljes rendszer fenntartásához szükséges. Ha az $EROI_{ext}$ értéke nagyobb mint 1:1, akkor az energiaforrás több energiát generál, mint amennyit a rendszer működtetéséhez felhasznál. Ez azt jelenti, hogy nettó energiafelesleg keletkezik, amit a társadalom más célokra, például gazdasági fejlődésre vagy egyéb tevékenységekre fordíthat. Ma már fontos mutatószám a fenntartható energiaforrások értékelésében, mivel lehetővé teszi az energia hatékonyságának és a társadalmi hasznosságának összehasonlítását a különböző technológiák között. A magas értékek azt jelzik, hogy az adott energiaforrás hatékonyan hoz létre energiát a társadalom számára, míg az alacsony értékek arra utalnak, hogy az energiaforrás kevésbé hatékony vagy akár energiaigényes lehet, ami korlátozza a hosszú távú fenntarthatóságot. Az $EROI_{ext}$ -mutató előnyei az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- Figyelembe veszi az energiaforrások teljes életciklusát, beleértve a kitermelést, feldolgozást, szállítást, valamint az infrastruktúra kiépítését és fenntartását. Ezáltal átfogóbban értékeli az energia hatékonyságát és a befektetett energia megtérülését a teljes rendszer szempontjából.
- Nemcsak a közvetlenül hasznosított energia mennyiségét vizsgálja, hanem a beruházásokhoz kapcsolódó energetikai költségeket is, mint például az új erőművek, hálózatok és átviteli vonalak építése és karbantartása. Ezáltal a valósághoz közelebbi képet ad az energiaforrás valós hatékonyságáról.
- A mutató segít meghatározni, hogy egy adott energiaforrás mennyi hasznos energia termelésére képes a társadalom számára. Ez lehetővé teszi az energiaforrások közötti összehasonlítást a társadalmi előnyök szempontjából.

- A mutató segítségével részletesebb képet kaphatunk az energiaforrások fenntarthatóságáról és hatékonyságáról.

Az $EROI_{ext}$ -mutató hátrányai és hiányosságai az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- A mutató számítása bonyolult, több tényezőt vesz figyelembe, ami megnehezíti a különböző energiaforrások közötti egyértelmű összehasonlítást.
- Számításához több esetben becslésre és következtetésre van szükség, például az energetikai költségek és a teljes rendszer hatásainak meghatározásához. Ez a számítások és az eredmények megbízhatóságát is befolyásolja.
- Az $EROI_{ext}$ elsősorban az energiaforrások hatékonysága és a társadalmi hasznosságuk összehasonlítására szolgál. Azonban további mutatók és elemzések alkalmazása is szükséges lehet a teljes kép kialakításához, ideértve a gazdasági fenntarthatóságot és a technológiai fejlettséget is (Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020; Diesendorf–Wiedmann, 2020).

Az $EROI_{ext}$ -, az $EROI_{st}$ - és az $EROI_{final}$ -mutatók együttesen segítenek a különböző energiaforrások összehasonlításában. Az $EROI_{ext}$ kiterjeszti az $EROI$ koncepcióját a teljes rendszerre, míg az $EROI_{st}$ és $EROI_{final}$ az energiaforrások különböző fázisaira fókuszálnak. A kombinált használatuk lehetővé teszi a hatékonyság, a fenntarthatóság és a társadalmi hasznosság teljesebb értékelését.

AZ EGYES TECHNOLÓGIÁK ÉS ENERGIAFORRÁSOK $EROI$ -ÉRTÉKEINEK ÁTTEKINTÉSE ÉS ÉRTÉKELÉSE

Jelen kutatás célja, hogy bemutassa a fosszilis energiahordozók, a megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák energiabefektetés-energiahozam arányát az $EROI_{st}$ -, az $EROI_{final}$ - és az $EROI_{ext}$ -mutatók alapján. A kutatás során az $EROI$ -mutatókat először elkülönítve (1–3. táblázat, 1. ábra), majd végül összesítve (4. táblázat) mutatjuk be, elősegítve ezzel a könnyebb áttekinthetőséget és érthetőséget.

Az $EROI_{st}$, amely az energiabefektetés-energiahozam arányt a primer energiaházisban méri, az 1. táblázatban látható értékekkel általánosabban szemlélteti a fosszilis energiahordozókra és a megújuló energiaforrásokra vonatkozó értékeket. Az 1. táblázat alapján látható, hogy a különböző energiaforrások és technológiák esetében az értékek változatosak, mivel a szakirodalmi forrásokban alkalmazott módszertanok és megközelítések nem egységesek. A fosszilis energiahordozók, mint például a szén, kőolaj és földgáz, általában magas $EROI_{st}$ -értékekkel rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy az energia kinyeréséhez viszonylag kevés befektetett energia szükséges. Ez részben annak köszönhető, hogy a fosszilis energiahordozók napjainkban még viszonylag hatékonyan hozzáférhetőek és kitermelhetőek.

Ugyanakkor a megújuló energiaforrások, mint például a szélenergia, a fotovoltaiikus (fotovillamos, PV) energia és a koncentrált napenergia (CSP), általában alacsonyabb értékekkel rendelkeznek ezen EROI-típus alapján.

Fontos megemlíteni, hogy 2020-ban Carlos de Castro és Iñigo Capellán-Pérez 161 szakirodalmi forrást és saját kutatást használt fel az $EROI_{st}$, az $EROI_{final}$, valamint az $EROI_{ext}$ -mutatók aktualizálásához. Ennek célja az volt, hogy naprakész képet kapjanak az értékek tekintetében, és friss adatokkal szolgáljanak. Ez különösen amiatt volt indokolt, mert míg például 1995-ben kutatásuk szerint a szén, a kőolaj és a földgáz $EROI_{st}$ -értéke körülbelül 50, 35 és 32 volt, 2011-re ezek az értékek mindhárom esetben egységesen megközelítőleg 30-ra csökkentek. A 2. táblázat de Castro and Capellán-Pérez (2020) alapján mutatja be ezeket a jellemzőket. A megújuló energiaforrást alkalmazó technológiák esetén megállapítható, hogy a vízerőművek általában magasabb értékekkel rendelkeznek, míg a szél erőművek és a napelemek alacsonyabb értékekkel bírnak. A napelemek hatékonysága azonban országonként változik. Ezzel szemben a koncentrált napenergia-rendszerek (CSP) általában alacsonyabb $EROI_{st}$ -értékeket mutatnak.

1. táblázat. Az energiabefektetés-energiahozam arány minimum–maximum értékei a fosszilis energiahordozók, a megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák esetében, az $EROI_{st}$ -értékek alapján

Megnevezés	$EROI_{st}$	Forrás
Szén (a kitermelés helyszínén)	40–80	Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019
Kőolaj (a kitermelés helyszínén)	15–20	Gagnon et al., 2009; Brandt, 2011; Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019
Földgáz (a kitermelés helyszínén)	18–75	Gagnon et al., 2009; Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019
Nagyobb teljesítményű vízerőmű	5,9–267	Schoenberg–Hall, 2008; Dale, 2010; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Pérez, 2020
Szél erőmű (szárazföldi, „onshore”)	4,7–125,8	Kubiszewski et al., 2010; Carbajales-Dale, 2017; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Pérez, 2020
Szél erőmű (tengerre telepített, „offshore”)	5,4–66,7	Kubiszewski et al., 2010; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Pérez, 2020
CSP	2,6–67,6	de Castro–Capellán-Pérez, 2018; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Pérez, 2020
Napelem	2,8–38	Raugei et al, 2012; Bhandari et al., 2015; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Pérez, 2020

2. táblázat. Az energiabefektetés-energiahozam arányának értékei de Castro és Capellán-Pérez munkája alapján (2020), a fosszilis energiahordozók, a megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák esetében, az $EROI_{st}$ -értékek alapján

Megnevezés		$EROI_{st}$	Forrás
Szén, kőolaj, földgáz (a kitermelés helyszínén)		30,0	Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Pérez, 2020
Nagyobb teljesítményű vízerőmű		28,4	de Castro–Capellán-Pérez, 2020
Szélérőmű (szárazföldi, „onshore”)		13,2	
Szélérőmű (tengerre telepített, „offshore”)		8,7	
Napelem (világ)		7,8	
CSP		2,6	
Napelem	Ciprus	12,5	
	Ausztrália	11,4	
	India	10,2	
	Kína	9,1	
	Spanyolország	8,7	
	Olaszország	7,7	
	Amerikai Egyesült Államok	8,0	
	Japán	7,5	
	Franciaország	6,5	
	Németország	5,1	
	Egyesült Királyság	4,4	
	Finnország	2,8	

Az $EROI_{final}$, azaz a végső fogyasztói szinten mért energiabefektetés-energiahozam arány értékeit a 3. táblázatban, a fosszilis energiahordozók esetében több szakirodalmi forrás, míg a megújuló energiaforrások esetében de Castro és Capellán-Pérez (2020) kutatásának eredményei alapján szemléltettjük. Az eredmények alapján látható, hogy a fosszilis energiahordozók napjainkban általában magasabb értékekkel rendelkeznek, míg a megújuló energiaforrások alacsonyabb értékeket mutatnak.

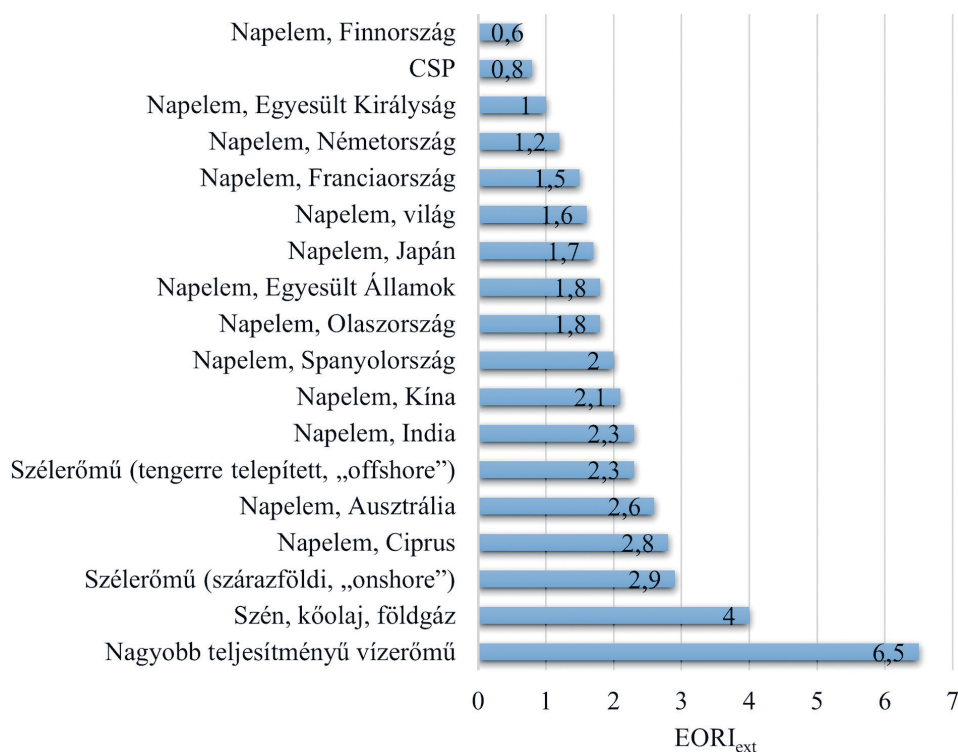
Érdemes megjegyezni, hogy a vizsgált fosszilis energiahordozók esetében magasabb $EROI$ -értékek láthatóak a kitermelés helyszínén, mint az energiafelhasználás szintjén mért $EROI_{final}$ -adatok esetében. Ez azt mutatja, hogy a kitermelés

és előállítás a fosszilis energiahordozók esetén napjainkban hatékonynak mutatkozik, viszont a felhasználás során a hozam aránya akár jelentősen is csökkenhet (például a szén és a földgáz esetén).

3. táblázat. Az energiabefektetés-energiáhozam arány jellemzői a fosszilis energiahordozók, a megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák esetében, az $EROI_{final}$ -értékek alapján

Megnevezés		$EROI_{final}$	Forrás
Szénből előállított villamos energia		6–14	Hall et al., 2014; Raugéi–Leccisi, 2016; King et al., 2018; Brockway et al., 2019
Kőolaj (finomított üzemanyagok)		4–18	Gagnon et al., 2009; Brandt, 2011; Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019;
Földgázból előállított villamos energia		4–5	Hall et al., 2014; Raugéi–Leccisi, 2016; King et al., 2018; Brockway et al., 2019
Nagyobb teljesítményű vízerőmű		13,0	de Castro–Capellán–Pérez, 2020
Szél erőmű (szárazföldi, „onshore”)		5,8	
Szél erőmű (tengerre telepített, „offshore”)		4,7	
Napelem (világ)		3,5	
CSP		1,6	
Napelem	Ciprus	5,7	
	Ausztrália	5,2	
	India	4,7	
	Kína	4,1	
	Spanyolország	3,9	
	Olaszország	3,5	
	Amerikai Egyesült Államok	3,6	
	Japán	3,4	
	Franciaország	2,9	
	Németország	2,3	
	Egyesült Királyság	2,0	
	Finnország	1,3	

Itt hangsúlyozandó, hogy az $EROI_{final}$ -mutató csak a végső fogyasztás szintjén mért energiabefektetés-energiahozam arányt veszi figyelembe, míg az $EROI_{ext}$ a teljes életciklust figyelembe véve számolja ki ugyanezt. Ezáltal az $EROI_{ext}$ a teljes rendszerhatékonyságot méri, és részletesebb képet nyújt az energiaforrás valószínű fenntarthatósági potenciáljáról. Az áttekintett tudományos kutatások szerint az $EROI_{ext}$ tekinthető jelenleg a legjobb mutatónak a különböző energiaforrások összehasonlítására és értékelésére, mivel ez a mutató tartalmazza a legtöbb releváns tényezőt a teljes életciklusra vonatkozóan. A mutató segítségével realisztikusabb módon nyílik lehetőség a fenntartható és hatékony energiaforrások azonosítására és kiválasztására a hosszú távú energiaellátás és a környezeti fenntarthatóság szempontjából. Az ezen mutatóval kifejezett energiabefektetés-energiahozam arány értékeket de Castro és Capellán-Pérez (2020) munkája alapján az 1. ábra mutatja be. Fontos megjegyezni, hogy a munka során a megújuló technológiák élettartama a következő értékek szerint lett figyelembe véve: CSP: 25 év, PV: 25 év, nagyobb teljesítményű vízerőmű: 75 év; szárazföldi (onshore) szél erőmű:



1. ábra. A fosszilis energiahordozók, a megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák energiabefektetés-energiahozam arányának értékei az $EROI_{ext}$ -számítás alapján (Zsiborács Henrik szerkesztése)

20 év; tengeri (offshore) szélérőmű: 20 év. Az eredmények alapján látható, hogy a fosszilis energiahordozók általában magasabb $EROI_{ext}$ -értékkel rendelkeznek a megújuló energiaforrások döntő hányadához képest. Ez azt jelenti, hogy ezek az energiaforrások még ebben a fázisban is nagyobb hozamot képesek elérni az energiabefektetéshez képest, mint az időjárásfüggő megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák, habár egyes esetekben a vízerőművek meglehetősen hatékonynak bizonyulnak. Ennek okai részben a megújuló energia technológiai fejlettségi szintjében, a környezeti tényezőkben (például: besugárzás, szélviszonyok), az alapanyagok előállításában és újrahasznosításában, valamint a beruházási költségekben keresendők. Azonban fontos kiemelni, hogy az alacsonyabb számok az időjárásfüggő megújuló energiaforrások esetében nem feltétlenül jelentenek kisebb mértékű értékteremtést, mivel ezek a technológiák a fenntartható energiaellátáshoz és a környezeti hatások csökkentéséhez járulnak hozzá (pozitív externáliák). A három mutató összesített értékeit a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat. A fosszilis energiahordozók, a megújuló energiaforrások és a velük kapcsolatos technológiák energiabefektetés-energiahozam arányának értékei a különböző EROI-számítások alapján

Megnevezés	$EROI_{st}$	$EROI_{final}$	$EROI_{ext}$	Forrás
Szén	30–80	6–14	4	Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020
Kőolaj	15–20	4–18	4	Gagnon et al., 2009; Brandt, 2011; Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020
Földgáz	18–75	4–5	4	Gagnon et al., 2009; Hall et al., 2014; Court–Fizaine, 2017; Brockway et al., 2019; de Castro–Capellán-Perez, 2020
Nagyobb teljesítményű vízerőmű	5,9–267	13,0	6,5	Schoenberg–Hall, 2008; Dale, 2010; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Perez, 2020
Szélérőmű (szárazföldi, „onshore”)	4,7–125,8	5,8	2,9	Kubiszewski et al., 2010; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Perez, 2020; Carbajales-Dale, 2023

4. táblázat folytatása

Megnevezés		EROI _{st}	EROI _{final}	EROI _{ext}	Forrás
Szélérőmű (tengerre telepített, „offshore”)		5,4–66,7	4,7	2,3	Kubiszewski et al., 2010; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán- Perez, 2020; Carbajales-Dale, 2023
Napelem (világ)		2,8–38	3,5	1,6	Raugei et al, 2012; Bhandari et al. 2015; Dupont et al., 2018; Kis et al., 2018; de Castro–Capellán-Perez, 2020
CSP		2,6–67,6	1,6	0,8	de Castro–Capellán-Pérez, 2018; Dupont et al., 2018; Kis et al. 2018; de Castro– Capellán-Perez, 2020
Napelem	Cíprus	12,5	5,7	2,8	de Castro–Capellán-Pérez, 2020
	Ausztrália	11,4	5,2	2,6	
	India	10,2	4,7	2,3	
	Kína	9,1	4,1	2,1	
	Spanyolország	8,7	3,9	2,0	
	Olaszország	7,7	3,5	1,8	
	Amerikai Egyesült Államok	8,0	3,6	1,8	
	Japán	7,5	3,4	1,7	
	Franciaország	6,5	2,9	1,5	
	Németország	5,1	2,3	1,2	
	Egyesült Királyság	4,4	2,0	1,0	
	Finnország	2,8	1,3	0,6	

A PV-technológiát illetően érdemes megemlíteni, hogy az erre vonatkozó EROI-értékek további javulása várható a jövőben, így ezek egyre jobban meg fogják közelíteni a fosszilis technológiák hatékonyságát. Ebben a folyamatban többek között az alábbi tényezők játszanak szerepet:

- A hosszabb élettartam hatása: Az EROI-értékek, amelyek huszonöt éves élettartamra vonatkoznak de Castro és Capellán-Pérez (2020) munkája alap-

ján, csak a rövid távú perspektívát tükrözik. A PV-modulok valós, műszaki élettartama azonban jóval meghaladhatja ezt az időtartamot. Egy remek példája ennek a jelenségnek a „TISO-10” rendszer, amely még mindig termel villamos energiát, negyvenkét évvel az indulása után. A mérések azt mutatják ennél a rendszernél, hogy a kezdeti teljesítményéhez képest negyven év alatt a modulok termelékenysége 0,2%–0,69%/év ütemben csökkent, ami a teljes időszak alatt 8%–27,6%-os teljesítményromlást eredményezett. Érdeemes megjegyezni, hogy a jelenleg megvásárolható napelemmodulok éves fizikai változásával ezek az értékek összhangban vannak (Annigoni et al., 2019). Abban az esetben, ha a PV-modulok hosszabb ideig működnek, mint huszonöt év, akkor annak eredményeként az EROI-értékek javulnak.

- Körkörös gazdaság és hulladékkezelés: A körforgásos gazdaság és a hatékony hulladékkezelés fejlesztése új lehetőségeket kínál a PV-rendszerekben használt anyagok újrahasznosítására. Ha az anyagokat hatékonyan vissza lehet nyerni és újra fel lehet használni, az csökkentheti az új anyagok előállításához szükséges energiaigényt. Ez a pozitív hatás pedig tovább javíthatja az EROI-értékeket. Emellett a használt napelemek iránt megnövekedett érdeklődés és kereslet tapasztalható Európában és világszerte egyaránt (URL1). Ennek eredményeként a hasznos műszaki élettartamuk meghaladhatja a hagyományosan becsült huszonöt évet. Ez a körülmény fontos szempont az EROI-értékek javulásának vonatkozásában.
- Technológiai fejlődés: Az EROI-értékek idővel változhatnak a technológiai fejlődés következtében is. Az innovációk, hatékonyságnövekedés és új anyagok fejlesztése is képes javítani a PV-rendszerek hatékonyságát és élettartamát, ami pozitív hatást gyakorol az EROI-értékekre.
- Energiahatékonyság javítása: Az EROI-értékek azáltal is javíthatók, ha a PV-rendszerek energiahatékonysága tovább fejlődik. Az energiahatékonyság növelése esetén növekszik a rendszerek által termelt energia mennyisége. Ez azt eredményezi, hogy kevesebb energiabefektetés lesz szükséges a rendszerek működtetéséhez, és jobb eredmények lesznek elérhetők az EROI-értékek tekintetében.

ÖSSZEGZÉS

Az $EROI_{st}$, az $EROI_{final}$, valamint az $EROI_{ext}$ -mutatók rendkívül fontos információval szolgálnak a különféle energiaforrások értékeléséhez, illetve kiválasztásához. Ezek a mutatók az energiabefektetés-energiahozam arányát fejezik ki, és segítenek megérteni, hogy egy adott energiaforrásból mennyi energia nyerhető ki az ahhoz felhasznált energiához képest. Ezek a mutatók lehetővé teszik az energiaforrások megfelelő módon való összehasonlítását és értékelését. Segítségükkel

meghatározható, hogy mely energiaforrások hatékonyabbak, fenntarthatóbbak és gazdaságosabbak. Fontos megjegyezni azonban, hogy a mutatók közül egyik sem veszi figyelembe az externális költségeket. Az externális költségek ebben az esetben olyan hatásokat jelentenek, amelyeket az energiaforrás használata közvetetten okoz a környezetre, a társadalomra és a gazdaságra nézve, például az üzemanyag előállítása, szállítása és felhasználása során keletkező kibocsátások, környezet-szennyezés, a hulladékkezelés költségei vagy a fogyasztói oldalon jelentkező energiaszolgáltatás környezeti, egészségügyi stb. következményei. Ahhoz, hogy teljes képet kapjunk az energiaforrások fenntarthatóságáról és hatékonyságáról, szükséges figyelembe venni ezeket az externális költségeket is, amelyeket még a legösszetettebb kiterjesztett számításokon alapuló $EROI_{ext}$ -mutató sem tartalmaz, habár a három vizsgált számítási módszer közül ez nyújtja a legátfogóbb képet az energiaforrások fenntarthatóságáról és hatékonyságáról.

Cikkünkben de Castro és Capellán-Pérez (2020) is hasonló véleményre jutottak, miszerint a legfontosabb mutató nem az egyes technológiák $EROI$ -értéke, hanem sokkal inkább egy, a teljes energiarendszert dinamikájában jellemző mutató lenne. Ezért az igazi cél annak a felmérése volna, hogy a teljes energiarendszer dinamikus $EROI$ -ja idővel milyen lehetséges következményekkel járhat a jövőbeli társadalmakra nézve (a kvantitatív modellezésben nehezen megragadható dimenziók vonatkozásában is, mint például a társadalmi, környezeti összefüggések sokfélesége). Egy meglehetősen magas $EROI$ -érték ennek értelmében szükséges, de nem elégséges feltétele a fenntartható energiarendszerek megvalósításának, illetve fenntartásának, amennyiben cél a társadalom nagy fokú komplexitásának megteremtése, illetve megőrzése.

Az $EROI$ -érték szerintük sem tájékoztat az energiaforrások és technológiák olyan kritikus szempontjairól, mint például azok környezeti hatásai, azaz az externális költségek, illetve társadalmi elfogadottságuk vagy az erőforrások jövőbeli rendelkezésre állása. Véleményünk szerint egyáltalán nem mindegy, hogy egy adott technológia vagy megoldás egy kimerülőben lévő vagy szűkösen rendelkezésre álló természeti erőforrás felhasználásában hatékony vagy esetleg egy lényegében korlátlan erőforrást aknázz ki, még ha, adott esetben, nem is olyan nagy hatásfokkal. Egyetértve de Castro és Capellán-Pérez (2020) véleményével, mi is úgy véljük, hogy mivel természetéből adódóan a fenntarthatóság többdimenziós fogalom, a különféle energiaforrások, -hordozók, technológiák realitásos értékelése is csak többdimenziós mutatók alkalmazásával érhető el, melyek egyik fontos összetevője lehet az $EROI$. Az $EROI$ annál részletesebb képet mutat, minél több tényezőt vesz figyelembe annak kiszámítása. Mindazonáltal az $EROI$ alkalmazhatóságát jelentősen korlátozza az alapvető tény, hogy az energiabefektetés- és energiahozam-értékek arányával csak energiaviszonyok kifejezésére képes, amit a feljebb említett szempontokat reprezentálni képes más mutatókkal együtt kívánatos alkalmazni, hiszen az adott energiaforrás, illetve technológia hasznossága

az energiahatékonyságon kívül olyan rendkívüli fontosságú tényezőktől is függ, mint például a társadalmi hasznosság és a környezeti hatások. Ennek következtében szükséges lenne a lehető legpontosabban definiálni a különféle EROI-mutatók alkalmazásának területeit, illetve korlátait, és meghatározni a velük együtt alkalmazandó egyéb mutatók körét, illetve azok kiszámításának és (együttes) alkalmazásának módszertanát.

Összességében megállapítható, hogy az energiahatékonysági és fenntarthatósági elemzések során az EROI-mutatók hasznosak lehetnek, de a teljes kép érdekében szükség van az externáliák szisztematikus értékelésére és figyelembevételére is. Ezek beépítése az energiaértékelésekbe még inkább segítheti a döntéshozókat és a szakembereket a fenntarthatóbb energiaforrások kiválasztásában és az energiasztratégiák kialakításában. Ezáltal lehetővé válhat a teljesebb kép kialakítása és a gazdaságilag, társadalmilag és környezeti szempontból optimális megoldások meghatározása.

*

A publikáció elkészítését a 2021-2.1.2-HÖ-2021-00004, valamint a 2021-2.1.1-EK-2021-00001 projektek támogatták.

IRODALOM

- Annigoni, Eleonora – Virtuani, Alessandro – Caccivio, Mauro et al. (2019): 35 Years of Photovoltaics: Analysis of the TISO-10-kW Solar Plant, Lessons Learnt in Safety and Performance–Part 2. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27, 9, 760–778. DOI: 10.1002/PIP.3146, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3146>
- Bhandari, Khagendra P. – Collier, Jennifer M. – Ellingson, Randy J. et al. (2015): Energy Payback Time (EPBT) and Energy Return on Energy Invested (EROI) of Solar Photovoltaic Systems: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 133–141. DOI: 10.1016/J.RSER.2015.02.057, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211500146X>
- Brandt, Adam R. (2011): Oil Depletion and the Energy Efficiency of Oil Production: The Case of California. *Sustainability*, 3, 1833–1854. DOI: 10.3390/SU3101833, <https://www.mdpi.com/2071-1050/3/10/1833>
- Brockway, Paul E. – Owen, Anne – Brand-Correa, Lina I. et al. (2019): Estimation of Global Final-Stage Energy-Return-on-Investment for Fossil Fuels with Comparison to Renewable Energy Sources. *Nature Energy*, 4, 7, 612–621. DOI: 10.1038/s41560-019-0425-z, https://eprints.whiterose.ac.uk/148748/1/2019_05_22_EROI-2_Author_accepted_manuscript.pdf
- Carbajales-Dale, Michael (2017): Life Cycle Assessment: Meta-Analysis of Cumulative Energy Demand for Wind Energy Technologies. Letcher, Trevor M. (ed.): *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, 439–473. DOI: 10.1016/B978-0-12-809451-8.00021-7, ISBN 9780128094518, <http://tinyurl.com/23rta2wu>
- Carbajales-Dale, Michael (2023): Life Cycle Assessment: A Meta-Analysis of Cumulative Energy Demand and Greenhouse Gas Emissions for Wind Energy Technologies. In: Letcher, Trevor M. (ed.): *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*.

- Chapter 29, 423–442. DOI: 10.1016/B978-0-323-99353-1.00028-1, ISBN 9780323993531, <http://tinyurl.com/23rta2wu>
- de Castro, Carlos – Capellán-Pérez, Iñigo (2018): Concentrated Solar Power: Actual Performance and Foreseeable Future in High Penetration Scenarios of Renewable Energies. *BioPhysical Economics and Resource Quality*, 3, An. 14, 1–20. DOI: 10.1007/S41247-018-0043-6, https://medeas.eu/sites/default/files/Castro_et_al-2018-BioPhysical_Economics_and_Resource_Quality.pdf
- de Castro, Carlos – Capellán-Pérez, Iñigo (2020): Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energies*, 13, 3036. DOI: 10.3390/EN13123036, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/12/3036>
- Ciaccia, Francesco (2022): Technology Innovation in the Energy Sector and Climate Change: The Role of Governments and Policies. *Natural Resource Management and Policy*, 47, 159–179. DOI: 10.1007/978-3-030-87564-0_10/COVER
- Court, Victor – Fizaine, Florian (2017): Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecological Economics*, 138, 145–159. DOI: 10.1016/J.ECOLECON.2017.03.015
- Dale, Michael Anthony Joseph (2010): *Global Energy Modelling: A Biophysical Approach (GEMBA)*. Ph. D. Thesis. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, DOI: 10.26021/3239, <https://ir.canterbury.ac.nz/items/dd9dfcca-c934-435e-be73-5cdfcb435aa5>
- Diesendorf, Mark – Wiedmann, Thomas (2020): Implications of Trends in Energy Return on Energy Invested (EROI) for Transitioning to Renewable Electricity. *Ecological Economics*, 176, 106726. DOI: 10.1016/J.ECOLECON.2020.106726, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800919320543>
- Dupont, Elise – Koppelaar, Rembrandt – Jeanmart, Hervé (2018): Global Available Wind Energy with Physical and Energy Return on Investment Constraints. *Applied Energy*, 209, 322–338. DOI: 10.1016/J.APENERGY.2017.09.085, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917313673>
- Gagnon, Nathan – Hall, Charles A. S. – Brinker, Lysle (2009): A Preliminary Investigation of Energy Return on Energy Investment for Global Oil and Gas Production. *Energies*, 2, 490–503, 2, 490–503. DOI: 10.3390/EN20300490, <https://www.mdpi.com/1996-1073/2/3/490>
- Hall, Charles A. S. – Lambert, Jessica G. – Balogh, Stephen B. (2014): EROI of Different Fuels and the Implications for Society. *Energy Policy*, 64, 141–152. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2013.05.049, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513003856>
- King, Lewes C. – van den Bergh, Jeroen C. J. M. (2018): Implications of Net Energy-Return-on-Investment for a Low-Carbon Energy Transition. *Nature Energy*, 3, 334–340. DOI: 10.1038/S41560-018-0116-1, https://www.researchgate.net/publication/324153157_Implications_of_net_energy-return-on-investment_for_a_low-carbon_energy_transition
- Kis Zoltán – Pandya, Nikul – Koppelaar, Rembrandt H. E. M. (2018): Electricity Generation Technologies: Comparison of Materials Use, Energy Return on Investment, Jobs Creation and CO₂ Emissions Reduction. *Energy Policy*, 120, 144–157. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2018.05.033, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421518303239>
- Kubiszewski, Ida – Cleveland, Cutler J. – Endres, Peter K. (2010): Meta-Analysis of Net Energy Return for Wind Power Systems. *Renew Energy*, 35, 218–225. DOI: 10.1016/J.RENENE.2009.01.012, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096014810900055X>
- Ram, Manish – Bogdanov, Dmitrij – Aghahosseini, Aarman et al. (2022): Global Energy Transition to 100% Renewables by 2050: Not Fiction, but Much Needed Impetus for Developing Economies to Leapfrog into a Sustainable Future. *Energy*, 246, 123419. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2022.123419, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422200322X>

- Raugei, Marco – Fullana-i-Palmer, Pere – Fthenakis, Vasilis (2012): The Energy Return on Energy Investment (EROI) of Photovoltaics: Methodology and Comparisons with Fossil Fuel Life Cycles. *Energy Policy*, 45, 576–582. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2012.03.008, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421512002133>
- Raugei, Marco – Leccisi, Enrico (2016): A Comprehensive Assessment of the Energy Performance of the Full Range of Electricity Generation Technologies Deployed in the United Kingdom. *Energy Policy*, 90, 46–59. DOI: 10.1016/J.ENPOL.2015.12.011, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421515302226>
- Schoenberg, B. – Hall, C. A. S. (2008): The Energy Return of (Industrial) Solar—Passive Solar, PV, Wind and Hydro (#5 of 6). *The Oil Drum*, 29 April 2008. <http://theoildrum.com/node/3910>
- URL1: *SecondSol GmbH. Price of Used and New PV Modules and Inverters.* <https://www.secondsol.com/de/index.htm>