

Az Európai Unió klímapolitikájának hatása az EU acéliparára II.

The impact of the European Union's climate policy on the EU steel industry II.

NAGY CSENGE¹ , TASZNER ZOLTÁN² , GREGA OSZKÁR³ 

¹PhD-hallgató, Miskolci Egyetem AVK, Miskolc, E-mail: nagycsenge.mail@gmail.com

²PhD, igazgató, Ózdi Acélművek Kft., Ózd, E-mail: zoltan.taszner@oamkft.hu

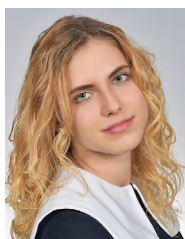
³PhD, vezető szakértő, SteelTech-Center Hungary, Miskolc, E-mail: gregadroszkar@gmail.com

A dolgozat az Európai Unió döntéselőkészítő szervezeteinek klímapolitikájával összefüggő, az üvegházhatású gázok kibocsátására vonatkozó, az Eurofer által korrigált célok eléréséhez szükséges technológiai összefüggéseket vizsgálja. Áttekinti a jelenlegi technológiai struktúrát, az ezzel összefüggő ÜHG-értékeket. Elemzi a célzott ÜHG-kibocsátáshoz megvalósítható technológiai változatokat, azok megvalósításainak nehézségeit. Bemutatja a folyamatban lévő fejlesztések perspektivikus változatait.

Kulcsszavak: acélgyártás, ÜHG, nyersvasgyártás, EAF, BOF, DRI

This thesis examines the technological interdependencies required to meet greenhouse gas (GHG) emission-reduction targets, as defined by EUROFER, within the context of European Union climate policy. It provides an overview of the current technological structure and the associated GHG emission levels. The study analyses technological options for achieving the target emission levels and discusses the challenges associated with their implementation. Finally, it outlines prospective scenarios for ongoing development projects.

Keywords: steelmaking, GHG (greenhouse gases), hot metal production, EAF (Electric Arc Furnace), BOF (Basic Oxygen Furnace), DRI (Direct Reduced Iron)



Bevezetés

Az Európai Unió Tanácsa 2011-ben elfogadott ütemterve szerint Európában 2050-re versenyképes, alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaság megvalósítása a cél. Az ütemterv szerint az európai iparnak abszolút értékben 80–95%-kal kell csökkentenie szén-dioxid kibocsátását az 1990-es szinthez képest. További egyeztetés alapján a 2030-as célkitűzés az üvegházhatású gázok kibocsátásának legalább 55%-os csökkentése [1].

Az Eurofer iparági bázisként a 2018. évet jelölte meg, ennek az esztendőnek a kibocsátási szintjét kell 30%-kal csökkenteni a 2030. évi kibocsátási szint eléréséhez. Előző dolgozatunkban ennek a célnak az eléréséhez szükséges megoldási lehetőségeket vázoltuk [2]. Ebben a kéziratban azt elemezzük, hogy a 2030 utáni időszakban milyen lehetőségek vannak, illetve milyen feltételek szükségesek az alapanyagellátás és technológiai struktúrák területén a 2050. évi ÜHG-kibocsátási célérték eléréséhez.

Technológiai sajátosságok

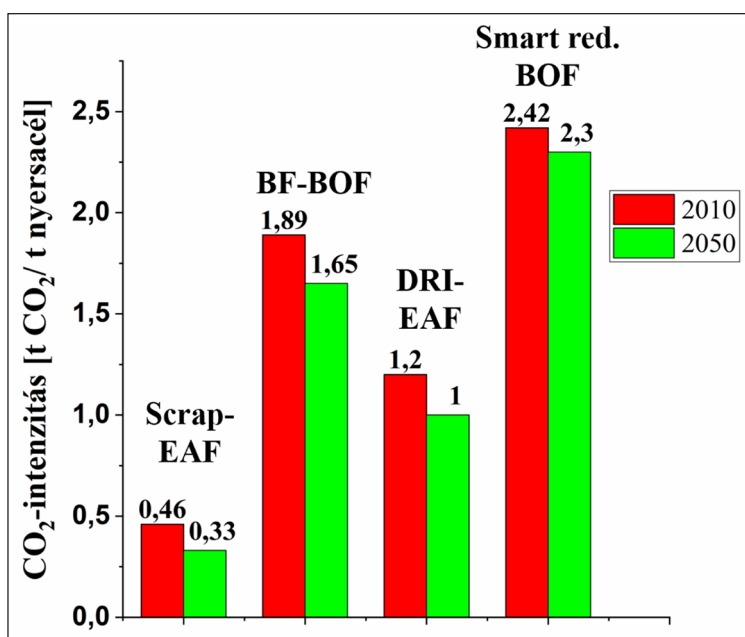
Az iparserű klasszikus acélgyártás két alapvető tömegtermelésre alkalmas technológiát alkalmaz: a nagyolvasztós folyékony nyersvasgyártáson alapuló oxigénkonverteres (BF-BOF) és a nagy-, ultranagy-, szupernagy teljesítményű transzformátorral működő villamos ívkemencés (EAF) technológiát. A BF-BOF technológia meghatározóan oxid tartalmú vasércet redukációjával nyeri a köztes terméként megjelenő folyékony nyersvasat, ami az oxigénes konverterek betétanyagát képezi, míg az EAF technológia a már egyszer a redukációs folyamaton átesett acélhulladékot használ betétanyagként. Mind a technológiai különbség, mind a különböző betétanyag alkalmazása hozzájárul az EAF technológia alacsonyabb ÜHG-kibocsátásához. A BF-BOF eljárásban redukálószerként és energiahordozóként egyaránt kohókokszt alkalmaznak, ami az integrált folyamat valamelyik szakaszában, szinte teljes egészében CO₂ formájában ÜHG-kibocsátásként jelenik meg.

Ezzel szemben a klasszikus EAF technológia többnyire amortizálódott (korábbi gyártási folyamatban keletkezett) acélhulladékok újra olvasztását villamos energia felhasználásával végzi, a fémolvadéknak az előállítani kívánt minőségű acélnek megfelelő, ún. szekunder kezelésével. Az acélhulladék a kibocsátás szempontjából (is) kedvező alapanyag, minthogy az előállításához szükséges energiaráfordítás már egy korábbi gyártási folyamat során megtörtént, így ÜHG-kibocsátása kvázi zéró.

A nagyolvasztós nyersvasgyártás évszázados múltira visszatekintő technológia, amely az eljárás technika folyamatos fejlődésének köszönhetően mindmáig

meghatározó szerepet tölt be a vas- és acéliparban. Hosszú távú fennmaradását számos előnye indokolja, ugyanakkor kedvezőtlen sajátosságai olyan fejlesztési irányokat is előtérbe helyeztek, amelyek a hagyományos technológiai módosításokon túl új eljárásváltozatok kialakulásához vezettek. Ennek eredményeként jöttek létre a folyékony terméket előállító olvadék-redukációs, valamint a szilárd fázisú terméket adó direktredukációs eljárások. E technológiák többsége ma már ipari léptékben is megvalósult, ugyanakkor részesedésük a globális termelésben továbbra is viszonylag alacsony.

A 2030–2050 időszak kvázi zéró kibocsátásához alap gondolat lehet a két technológia közötti meghatározó kibocsátás-különbségből következő technológiai aránymódosítás, azaz a BOF-BF technológia teljes kiváltása EAF technológiával. Könnyű azonban belátni, hogy ez a hipotetikus megoldás nem kivitelezhető a két technológia eltérő alapanyagigénye és -volumene közötti eltérések miatt. A két meghatározó acélgyártási technológiát ÜHG-kibocsátás szempontjából többféleképpen lehet értékelni. A két eljárás a metallurgiai munkát tekintve is lényegesen különbözik. A BF-BOF nagyolvasztós nyersvasgyártáson alapuló technológiában a kohókoksznak a redukáló feladaton túl szilárdsági és permeabilitási tulajdonságai is fontos szerepet töltenek be, alkalmazásának mellőzése, helyettesítése csak nagyon korlátozott mértékben lehetséges, így az ÜHG-kibocsátás csökkentésének is korlátozottak a lehetőségei. A BF-BOF eljárás ÜHG-kibocsátása lényegében a nagyolvasztónál jelenik meg. Fajlagos értéke az Eurofer adatai szerint 2,32 t CO₂/t nyersacél (1. ábra) [3, 4].



1. ábra. Acélmetsallurgiai technológiák ÜHG-kibocsátási értékei 2010-ben és a célértékek 2050-ben (EUROFER)

Konkrét számszerű értékre a BCG szolgáltat adatot, 1,89 értékkel, hazai irányszámot a Nemzeti Kiosztási Tervből nyerhetünk, amely szerint a Dunaferr Zrt. engedélyezett kibocsátása 1,6 Mt termeléssel számolva 1,0 t CO₂/t [4, 5].

A klasszikus EAF technológia esetében az olvasztás villamos energiával történik, szén-dioxid keletkezésével – tekintet nélkül a grafitelektródák oxidációjából származó szén-dioxidra és a segédüzemi kibocsátásra – nem kell számolni. Amennyiben a villamos energia előállítása fosszilis energiahordozók felhasználásával történik, természetesen kalkulálni kell addicionális CO₂ kibocsátással. Konceptcionális – azonban az acélipar klímastratégiai helyzetének megítélése és a szükséges intézkedések szempontjából lényeges – kérdés, hogy ehhez az értékhez hozzáadódik-e a felhasznált villamos energia előállításakor keletkező ÜHG, vagy ez a mennyiség az energiaipart terheli. A BCG adatai szerint az EAF kibocsátás fajlagos értéke 0,46. Hazai érték az ÓAM 2005–2009 időszak monitoring jelentések átlagos értéke szerint 0,138 t/t. Az összehasonlítás érdekében ehhez hozzáadódik a felhasznált villamos energia ÜHG vonzata. Az MVM adatszolgáltatása szerint a Mátrai Erőműben egy kWh előállítása 0,35 tonna CO₂-t eredményez. Az ÓAM fajlagos villamosenergia-felhasználásával szá-

molva ez 0,158 értékkel 0,3 t/t értékre növeli az összes kibocsátást, ami az európai átlag 65%-a.

Energetikai szempontból vizsgálva a két eljárást további ÜHG-forrásokkal kell számolnunk. Az ÜHG-kibocsátást, a nagyolvasztó üzemi hőmérsékletét a felhasznált kohókokszon túl a befűvott forró levegő felmelegítéséhez szükséges, nem technológiai eredetű fűtőgáz is növeli. Az EAF technológia üzemi hőmérsékletét villamos áram biztosítja, amely jellemzően hagyományos tüzelésű erőműből érkezik, így energiahordozóként a villamos energia előállításához szükséges erőműi fosszilis energiahordozók karbon-tartalmából keletkező CO₂ energetikai szempontból az acélgéártási technológiát terheli.

A technológiai arányváltoztatásban korlátot jelentenek a gazdasági vonatkozások is. A vaskohászati technológiák rendkívül tökeigényesek, így amortizációjuk is hosszú idejű. Különösen vonatkozik ez a nagy térfogatú, korszerű, hosszú élettartamú nagyolvasztókra, ezek élettartam előtti leállítása jelentős jövedelmezőségi problémákat indukál.

A kibocsátás csökkentés dilemmái

A 2030–2050 időszak kibocsátás csökkentésének megvalósítása az acélipar dinamikus strukturális állapotának a függvénye. Az eddigi trendek ismeretében

1. táblázat. Az acélgéártásban használt acélhulladék export-import forgalma [9] (A megjelölt adatbázis tartalmazza a táblázatban szemléltetett kategóriák részletes leírását a tagországok megnevezésével)

Export [ezer tonna]	Régió	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	EU-27	41 325	41 569	42 109	42 905	43 512	44 766
	Egyéb Európa	10 700	10 064	9 005	9 975	10 225	9 415
	Összes (EU)	52 025	51 633	51 114	52 880	53 737	54 181
	Világ	102 081	99 907	99 554	98 726	98 167	99 455
Import [ezer tonna]	Régió	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	EU-27	32 273	31 671	31 141	32 077	31 776	30 051
	Egyéb Európa	22 106	20 020	23 952	25 833	22 332	20 146
	Összes (EU)	54 379	51 691	55 093	57 910	54 108	50 197
	Világ	103 276	102 275	98 471	100 678	96 954	97 374
Export-Import szaldó	Régió	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	EU-27	9 052	9 898	10 968	10 828	11 736	14 715
	Egyéb Európa	-11 406	-9 956	-14 947	-15 858	-12 107	-10 731
	Összes (EU)	-2 354	-58	-3 979	-5 030	-371	3 984
	Világ	-1 195	-2 368	1 083	-1 952	1 213	2 081

a termelés volumene, a működő technológiák aránya bizonytalanságokat rejt. Az OECD 2025-ös acélipari kilátásai szerint a világ többletkapacitása 2027-re 721 millió tonnára emelkedik – ez körülbelül 290 millió tonnával több, mint az OECD-országok teljes acéltermelése 2024-ben. Ez az erős növekedés a gyenge globális acélkereslet ellenére is bekövetkezik, oka nagyrészt a folyamatos kapacitásbővítés [6]. Az EU teljes acéltermelési kapacitása 217 millió tonna, a termelés a 2018–2023-as időszakban 160 és 126 millió tonna között változott csökkenő tendenciával, ami azt jelenti, hogy az EU 57 és 91 millió tonna közére tehető túlkapacitással rendelkezik napjainkban [7]. Ezek a technológiai és piaci torzulások számos nem OECD-ország finanszírozási kiegyensúlyozatlanságának köszönhetők. Különösen szembevető a kínai acélpár támogatásai. A kínai acélexport 2020 óta több mint kétszeresére nőtt, és 2024-ben rekordszintet, 118 millió tonnát ért el. Ez a fejlemény súlyos nyomást gyakorolt az OECD-országok acélpiacaira [8].

Az ÜHG-kibocsátás szempontjából rendkívül fontos a rendelkezésre álló acélhulladék mennyiségének a meghatározása, amihez egzakt adatok nagyon korlátozottan állnak rendelkezésre. Ezzel kapcsolatban a Worldsteel adatbázisa szolgáltat információkat, az acélhulladék export-import adatok forgalmának jegyzékével [9]. Az 1. táblázatban az EU-27, teljes Európa és a Világ adatait tüntettük fel.

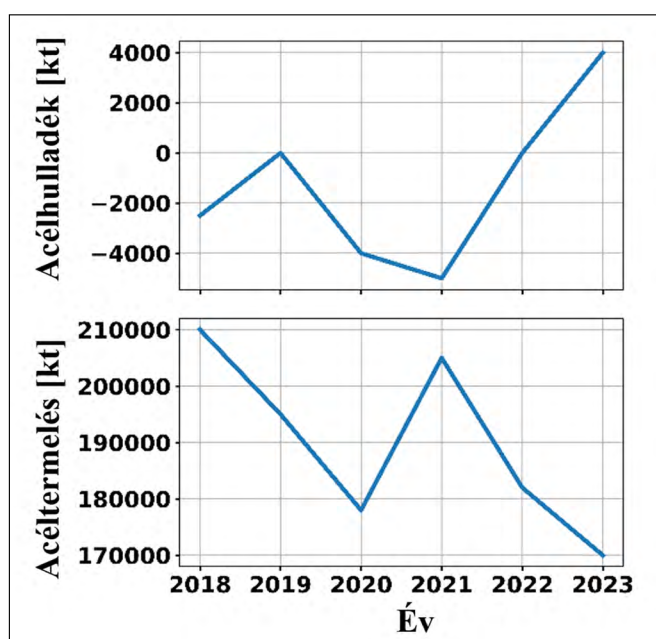
Mint az 1. táblázatból látható, az EU acélhulladék-forgalma viszonylag nagy mennyiségeket mozgat, azonban a szaldó 14 715 kt exporttöbbletet, míg az Európán kívüli országok szaldója 10 731 kt importot mutat. Egységként kezelve a két gazdasági szekciót, Európa acélhulladék-ellátása lényegében egyen-

súlyban van. A világ hasonló adatainak az összesítése az összevetés pontosságát hivatott ellenőrizni. A külkereskedelmi szaldónál kimutatott 2081 millió tonna a teljes forgalomnak 2%-a, így az adatelemzés megfelelő pontosságúnak mondható.

A hulladék külkereskedelem volumenét és trendjét vizsgálva az látható, hogy a szaldó volumene teljes Európa esetében viszonylag kis értékű, de ezen belül erősen változó. Az okokat keresve a 2. ábrán az acéltermelés trendjének függvényében vizsgáltuk a hulladékforgalom volumenét. Az látható, hogy a két görbe közel tükörképe egymásnak, azaz a hulladékszaldó főképpen az acéltermelés volumenével van összefüggésben.

A következtetések alapjául szolgáló adatok nagy valószínűséggel a technológiai felhasználásra kerülő mennyiségekre vonatkoznak. Ezzel szemben a BCG a jelenlegi hulladéktöbbletet kilencmillió tonnára becsüli, ami ugyancsak becslés szerint 2030-ra 15 millió tonna deficitre változik, azaz 23 millió tonna hiány jelentkezik a jelenlegi termelési szint mellett [10].

A két eljárás ÜHG-kibocsátása közötti különbségből egyenesen következhetne a megoldás: a nagyolvasztós technológiát a 2030–2050 közötti 20 évben fel kell váltani az EAF technológiával. A tényleges megoldás azonban nem egyértelmű, mivel a rendelkezésre álló és keletkező acélhulladék mennyisége korlátozott, nem elegendő a prognosztizált mennyiségű acél előállításához. További nehézség, hogy a 100% EAF technológia működtetéséhez szükséges erőműi kapacitás, villamos elosztó- és vezetékes hálózat létesítése kérdéseket vet fel, illetve ugyancsak problémát okoz a zéró emisszióhoz elengedhetetlen hidrogén-előállító rendszer kapacitásának biztosítása.



2. ábra. Acélhulladék kereskedelmének mértéke az acélgyártási volumen függvényében

2. táblázat. Az acéltipar technológiai útvonalainak csoportosítása [4, 15]

Útvonal/Csoport	Alcsoport/Technológia	Leírás	Projektek/Kezdeményezések
Körforgásos gazdaság	Újrahasznosítás	Az acél (pl. BOF/EAF salak) és melléktermékeinek újrahasznosítása, erőforrás-hatékonyság	BOF: Basic Oxygen Furnace (oxigénkonverter) EAF: Electric Arc Furnace (elektromos ívkemence)
Smart Carbon Usage (SCU)	Folyamatintegráció alacsonyabb szénfelhasználással (+CCS)	Folyamatintegráció Melléktermék visszavezetése és CO/CO ₂ hasznosítása (CO/CO ₂ kémiai átalakítása)	HISARNA, TGR-BF-Plasma (IGAR), PEM, STEPWISE, Torero
	Szénhasznosítás/CCU (+CCS)		Steelanol, Carbon2Chem, FREsMe, Everest, Carbon2Value
Carbon Direct Avoidance (CDA)	Hidrogén	A szén közvetlen kiváltása hidrogénnel az acélgéártásban	HYBRIT, H2Steel (H2Future, SuSteel, Hybrid Steel Making), tkH2Steel
	Villamos energia	Megújuló villamos energia alkalmazása az acélgéártásban, pl. H ₂ előállítása a szén kiváltására	GrInHy, SALCOS, Hydrogen Hamburg, SIDERWIN

A nagyolvasztó mint technológiai berendezés nagy értékű, amortizációja hosszú időt igényel, így a működő és építendő nagyolvasztókat az előbbiekből következően hosszú működési időre tervezik. A fentiekből következik, hogy a kvázi zéró kibocsátás az európai acéltiparban a meglévő két meghatározó acélgéártási technológia arányváltoztatásával önmagában nem lehetséges, a 2050-re elérendő kvázi zéró kibocsátáshoz a nagyolvasztó technológiájának részleges módosítása mindenképpen szükséges.

A további lépésekbe illeszkedik a meglévő olvadé- és direktredukciós eljárások célzott technológiai módosítása. A folyamatba integrálódnak a villamos energia előállításával kapcsolatos ÜHG-kibocsátás-csökkentett vagy -mentes megoldások, mint a szélenergia, napenergia alkalmazása. Ezek a zéró ÜHG energia-előállító megoldások vezetnek el a hidrogén ipari méretű előállításának lehetőségéhez, megteremtve ezzel az acéltiparban felhasználható új redukálószer.

Kvázi zéró ÜHG-kibocsátás az acéltiparban

Az előző fejezet részben felvázolt célkitűzések megvalósításához a technikai nehézségek, a rendkívül magas költségigény, a kapcsolódó technológiák integrációs igénye miatt az európai acél- és más iparágak, akadémiai intézetek az Európai Közöségi hatodik kutatási, technológiafejlesztési és demonstrációs keretprogramja a feladat megoldását célzó kutatási programokat indított. Ezeknek a kutatási programoknak egyik része a nagyolvasztó technológiájának a módosítását célozta, a másik irány a klasszikus direktredukciós eljárások módosítása a kibocsátási célokat eredményező megoldásokkal [11–13].

Az ULCOS és a módosított DRI útvonalak megjelenésével az acéltipari dekarbonizáció leírására néhány, ma már széles körben használt kategória vált szükségessé [13]. A Smart Carbon Usage (SCU) olyan átmeneti fejlesztési irányt jelöl, amely a meglévő nagyolvasztós-konverteres technológiák CO₂-kibocsátás-csökkentésére (folyamatintegráció, alacsonyabb szénfelhasználás) fókuszál. Ezzel szoros kapcsolatban áll a CCU (szén-dioxid-leválasztás és -hasznosítás), ahol a leválasztott CO₂-t alapanyagként vegyipari termékek (pl. alkoholok, metanol, ammónia) előállítására használják, illetve a CCS (leválasztás és tárolás), amely a CO₂ föld alatti elhelyezésével csökkenti a légköri kibocsátást. A Carbon Direct Avoidance (CDA) a kibocsátás megelőzését célozza: a fosszilis redukálószer kiváltását hidrogénnel (H₂-DRI jellegű útvonalak) és/vagy a megújuló villamos energia közvetlen alkalmazását (pl. EAF-alapú acélgéártás, „zöld hidrogén” előállítása) foglalja magában. A technológiai utak rendszerezését jól szemlélteti a 2. táblázat [4, 15].

Az EU acéltiparának stratégiai technológiai útvonalai

Számos ország nagy figyelmet fordít az acéltipar kibocsátás-csökkentő technológiáira, illetve az acéltipari vállalatok átalakítására és innovatív megújítására. Példaként megemlíthető a japán COURSE50, a koreai FINEX-CEM, a kínai hidrogén-metallurgiai projektek, az európai ULCOS és az ausztriai H2FUTURE projekt, a svédországi HYBRIT projekt, valamint a németországi Carbon2Chem és SALCOS projektek [16]. Európában a nagyolvasztós nyersvasgéártási

3. táblázat. ULCOS II, technológiai kezdeményezések [16]

Projekt név	Leírás	Hatékonyság CO ₂ -emisszió (%)
ULCOS-BF (torokgáz visszavezetése)	TGR (top gas recycling): a nagyolvasztók fűvonyílásán beáramló előmelegített levegő helyett O ₂ -t használ. A kezelt nagyolvasztógázt a fő fűvonyílásnál 1200 °C-on és az alsó aknában 900 °C-on fűvatják be. VPSA (Vacuum Pressure Swing Adsorption): CO ₂ megkötése (majd föld alatti tárolása/metanol előállítás)	-26
HIsarna, Hismelt (koksmentes acélgártás)	HIsarna eljárás: olvasztó ciklonkemence (érc redukciója és folyósítószer megolvasztása) Hismelt eljárás: reaktor (végső redukció szénrel és O ₂ -vel) Koks helyett porított szén és érc használata	-20
		-80 (+ CCS)
ULCORDED (közvetlen redukció gyorsított eljárása)	Vasérc előkezelése földgázzal/biomasszával (red.szer) A földgáz előállításának hőellátása fedezhető a közvetlen redukcióból származó felesleges hő (DRI – direct reduced iron) hasznosításával	Fejlesztés alatt
ULCOWIN (vasérc elektrolízise alkalis elektrolitban)	A vasérc 110 °C-on történő elektrolízise Nincs direkt CO ₂ -kibocsátás, egyetlen melléktermék az O ₂	Fejlesztés alatt
ULCOLYSIS (olvadék-oxid/ salakelektrolízis)	A folyékony salakban oldott vasércet 1600 °C-on redukálják elektrolízissel Nincs direkt CO ₂ -kibocsátás	Fejlesztés alatt

technológia módosítását az ULCOS (Ultra-Low CO₂ Steelmaking) program célozza (3. táblázat). Ez az új, módosított szénalapú olvasztási redukciós koncepció, amelynek elemei magukban foglalják a nagyolvasztó technológiájának módosítását tiszta oxigén felhasználásával és a torokgáz újrahasznosításával, jelentősen csökkentve a CO₂-kibocsátást a széndioxid-leválasztás és -tárolás révén [14, 16–18].

Megvalósíthatóságát technológiai, gazdasági előrejelzések és társadalmi elfogadhatóság szempontjából is ellenőrzik. A végső sikeres megoldást technikai-technológiai és nem technikai kritériumok (jövőbeli energiapiac, a CO₂-kibocsátás-csökkentési költségek piaci árba való beépítése, társadalmi elfogadottság) alapján kell kiválasztani. A TGR technológia jelenleg megvalósíthatóbb a hagyományos nagyolvasztókban és más új technológiákhoz képest, illetve az oxigén használata (levegő helyett) is kedvez a CO₂ leválasztásának a kemence torokgázából, mivel nem visz be N₂-t a rendszerbe. Ugyanakkor a torokgáz CO₂-szétválasztásának villamosenergia-igénye nagyrészt elensúlyozza az energiatakarékosság és a fogyasztás-csökkentés hatásait [16].

A svéd HYBRIT koncepció a hagyományos nagyolvasztó-útvonal kiváltására törekszik, és a vas-oxidok H₂-nel történő redukciójára (H₂-DRI) épít, amelynek célja a fosszilis szén redukálószer szerepének megszüntetése és a zéró emisszió felé történő elmozdulás. A német Carbon2Chem projekt a kohászati melléktermék-gázok és a leválasztott CO₂ anyagkörülforgásba vonását célozza, a széntartalmú gázáramokat nitro-

génnel és hidrogénnel kombinálva vegyipari alapanyagokká alakítja. A SALCOS/GrInHy programok megújuló villamos energiára alapozott, elektrolízissel történő H₂-termelést demonstrálnak [11, 18–20].

Összefoglalás

A vizsgált technológiai összefüggések alapján az EU acéliparában a 2050-re kitűzött kvázi zéró ÜHG-kibocsátás elérése nem értelmezhető egyetlen domináns technológia kizárólagos bevezetésével, mivel az eljárások megvalósíthatóságát egyszerre korlátozza az alapanyag-ellátás (különösen az acélhulladék mennyisége és minősége), a villamosenergia-rendszer kapacitása és karbonintenzitása, valamint a hidrogéntermelés és -logisztika ipari léptékű rendelkezésre állása.

A 2030-as időhorizonton reálisan a Smart Carbon Usage (SCU) jellegű, meglévő BF-BOF rendszerekhez illeszkedő beavatkozások (folyamatintegráció, szénfelhasználás mérséklése, torokgázkezelés, CO₂-leválasztás és adott esetben CCS/CCU) adhatják a legnagyobb rövid távú kibocsátáscsökkentési potenciált, mivel ezek részben kompatibilisek a jelenlegi technológiával és amortizációs ciklusokkal.

A 2030–2050 közötti időszakban ugyanakkor a kibocsátás további teljes dekarbonizációja csak a Carbon Direct Avoidance (CDA) útvonalak (H₂-alapú közvetlen redukció, megújuló villamos energiára támaszkodó EAF/elektrolízises megoldások) felbonthatásával képzelhető el, ami a redukálószer- és energiahordozó-váltás révén a kibocsátás megelőzésére

helyezi a hangsúlyt. Mindezek miatt a technológia-választás valójában rendszerszintű optimalizációs feladat, ahol a műszaki paraméterek mellett a beruházási intenzitás, a CO₂-kezelés infrastruktúrája (szállítás-tárolás-hasznosítás), a hálózati csatlakozási lehetőségek és az energiaár-kitettségek egyaránt döntő tényezők.

Következésképpen a 2050-es kvázi zéró acélipari ÜHG-cél nem egyetlen technológia alkalmazásával érhető el, hanem egy időben lépcsőzött technológiai stratégiával: 2030-ig SCU/CCS-optimalizálás, majd 2030 után a CDA (H₂/elektromos) arányának fokozatos növelése.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatási témát a Miskolci Egyetem Steel-Tech-Center Hungary projektje támogatja. – This research is supported by the SteelTech-Center Hungary project of University of Miskolc.

Irodalom

- [1] A 2050-ig megvalósítandó alacsony szén-dioxid-kibocsátású gazdaság felé | EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/HU/legal-content/summary/moving-towards-a-low-carbon-economy-in-2050.html> [elérve: 2026. 1. 28.]
- [2] Nagy Csenge, Taszner Zoltán, Grega Oszkár: Az Európai Unió klímapolitikájának hatása az EU acéliparára. *Bányászati és Kohászati Lapok*, 2025, 158, 2–10. <https://doi.org/10.63457/BKL.158.2025.1.1>.
- [3] Jean I., Ghenda T., Hans I., Lungen B.: Potential for CO₂ mitigation of the European steel industry. *Stahl-Zentrum Stahlinstitut VDEh*.
- [4] Wortler M., Schuler F., Voigt N., Schmidt T., Dahmann P., Bodo Lungen H., Ghenda J.-T.: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050: Technical and economic analysis of the sector's CO₂ abatement potential.
- [5] Magyarország Nemzeti Kiosztási Terve – Alapelvek. https://www.levego.hu/sites/default/files/kiadvany/energiapolitika/nkt_040624.pdf
- [6] Manthey E.: Why ferrous scrap is emerging as a key strategic raw material. *ING THINK Economic and Financial Analysis*, 2023, Nov. 16. <https://think.ing.com/articles/why-is-ferrous-scrap-a-strategic-raw-material/> [elérve: 2026. 2. 2.]
- [7] Gunung Capital: Importance of steel scrap in steel industry decarbonisation. *LinkedIn*. <https://www.linkedin.com/pulse/importance-steel-scrap-industry-decarbonisation-gunung-capital> [elérve: 2026. 2. 2.]
- [8] Hunscheidt H: OECD schlägt Alarm: Globale Überkapazitäten bedrohen Zukunft der Stahlindustrie. *MarketSTEEL*, 2025. Mai. <https://www.marketsteel.de/news-details/oecd-schlaegt-alarm-globale-ueberkapazitaeten-bedrohen-zukunft-der-stahlindustrie.html> [elérve: 2026. 2. 2.]
- [9] Worldsteel Steel Statistical Yearbook 2025. https://worldsteel.org/media/publications/ssy_subscription-2025/
- [10] Lee J., Voigt N., Feth M., Chhibbar G.: Shortfalls in scrap will challenge the steel industry. *BCG*, 2024 March. <https://www.bcg.com/publications/2024/shortfalls-in-scrap-will-challenge-steel-industry> [elérve: 2026. 2. 2.]
- [11] Holappa L.: A general vision for reduction of energy consumption and CO₂ emissions from the steel industry. *Metals*, 2020, 10/9, 1–20. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
- [12] de Villafranca Casas M. J., Smit S., Nilsson A., Kuramochi T.: Climate targets by major steel companies: An assessment of collective ambition and planned emission reduction measures. *Energy and Climate Change*, 2024, 5, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100120>
- [13] Abdul Quader M., Shamsuddin Ahmed, Dawal S. Z., Nukman Y.: Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient Ultra-Low Carbon Dioxide (CO₂) steelmaking (ULCOS) program. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55, 537–549. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.10.101>
- [14] A green deal on steel: Making the EU steel industry the flagship of EU climate policy. 2020. <https://circabc.europa.eu/sd/a/906caa4e-5220-403a-abe6-3371ebc1256b/Steel-20200128-WG-pres-Pt%204-Eurofer-pstation-Green%20deal.pdf>
- [15] Zhang X., Jiao K., Zhang J., Guo Z.: A review on low carbon emissions projects of steel industry in the world. *J. Clean. Prod.* 2021, 306, 127259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127259>
- [16] Weigel M., Fishedick M., Marzinkowski J., Winzer P.: Multicriteria analysis of primary steelmaking technologies. *J. Clean. Prod.*, 2016, 112, 1064–1076. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.132>.
- [17] Wang R. R., Zhao Y. Q., Babich A., Senk D., Fan X. Y.: Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry – An overview of challenges and opportunities. *J. Clean. Prod.*, 2021, 329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129797>
- [18] Innovation Fund: Driving clean innovative technologies towards the market. *HYBRIT Demonstration: Swedish large-scale steel value chain demonstration of Hydrogen Breakthrough Iron-making Technology*. Hybrit development AB (SE). https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-07/if_pf_2022_hybrit_en.pdf
- [19] Kushnir D., Hansen T., Vogl V., Åhman M.: Adopting hydrogen direct reduction for the Swedish steel industry: A Technological Innovation System (TIS) study. *J. Clean. Prod.*, 2020, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118185>
- [20] Arens M., Worrell E., Eichhammer W., Hasanbeigi A., Zhang, Q.: Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term – the case of Germany. *J. Clean. Prod.*, 2017, 163, 84–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.097>