

A SZÉNHIDROGÉNEK GLOBÁLIS SZEREPE AZ ENERGIATERMELÉSBEN

LAKATOS ISTVÁN^{1,2}–LAKATOS-SZABÓ JULIANNA¹–
SZENTES GABRIELLA^{1,2}

¹Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, Miskolci Egyetem

²MTA-ME Műszaki Földtudományi Kutatócsoport, Miskolci Egyetem

1. BEVEZETÉS

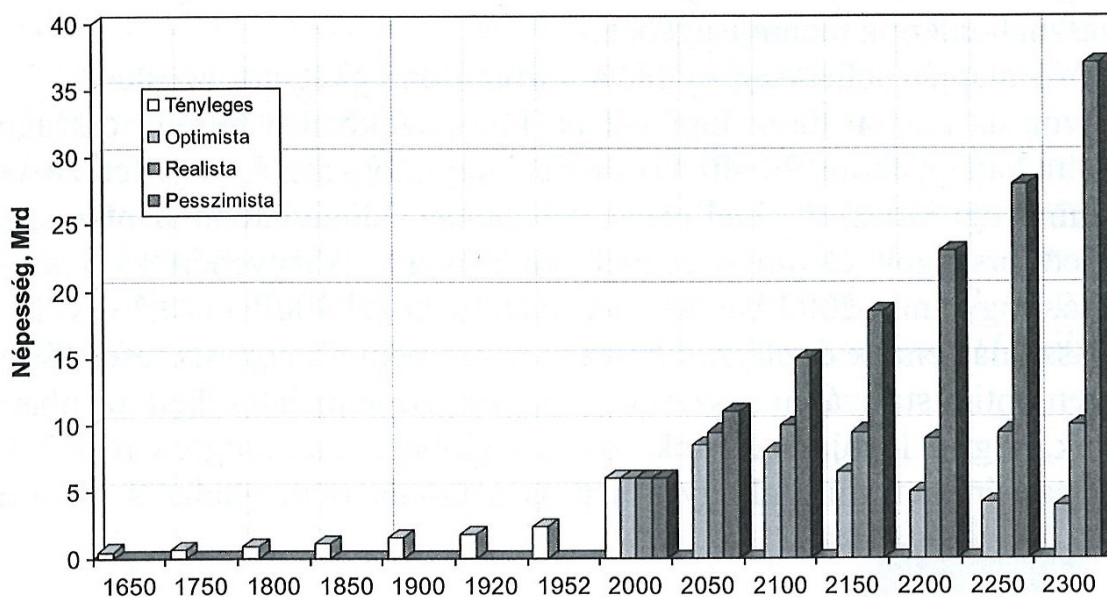
„A társadalmi fejlődésnek mindig jelentős tényezője volt az energiaellátás módja, befolyásolva a termelőtevékenységet és az életvitelt. A társadalom intézményeinek állapota és működése viszont az energiaellátás feltételeire és lehetőségeire gyakorol jelentős hatást. Stratégiai jelentősége miatt az olajforrások birtoklása a világpolitika egyik legfontosabb mozgatórugójává vált, az olajforrások felfedezése jelentéktelen térségekből kincsesbányákat varázsolt, amelyek kiaknázásáért megindult a gazdasági, diplomáciai és katonai versengés. Az olajüzlet horribilis jövedelmet biztosít, a világkereskedelem negyedét a kőolajforgalom teszi ki. A kőolaj és földgáz vált a világ alapvető energiahordozójává, de a szénhidrogének nemcsak az energetikából szorították ki a szenet, hanem abból az alapanyagrendszerből is, amit a szerves vegyiparban hosszú ideig betöltött.” *Vajda György: História, 2002. 11. 11.*

„Energy demand is expected to grow in the 21st century. The energy demand will be met by a global energy mix that is undergoing a transition from the current dominance of fossil fuels to a more balanced distribution of energy sources. Motivation of energy diversification includes population growth, quality of life, clean energy, resources/reserves... An understanding of the energy options available to us in the 21st century requires an understanding of a range of scientific theories. The scientific revolution will be based on fundamental change of old paradigms.” *John R. Fanchi in „Energy in the 21st Century”, Gulf Professional Publisher, Austin.*

2. A NÉPESSÉG ÉS AZ ENERGIAGÉNY ALAKULÁSÁNAK KAPCSOLATA

Az Egyesült Nemzetek Szervezetének egyik meghatározó szervezete, a Department of Economic and Social Affairs (Population Division) 2004-ben közzétette „World Population to 2300” című kiadványát, amelyben előrejelzést adott ki a világ népességének várható alakulásáról. Tekintettel a hosszú távú előrejelzések bizonytalanságára optimista, realista és pesszimista előrejelzést közöltek a várható trendekre, ami az *1. ábrán* látható. A számítás abból indult ki, hogy 2000-ben a világ népessége 6 milliárd, ami 2050-re optimista becslés szerint 8,5 milliárdra, realista becslés szerint 9,5 milliárdra nő. Sajnálatos tény, hogy a népesség növekedése az elmúlt közel 20 év alatt, 2018-ra már elérte a 7,6 milliárdot, tehát meghaladta a realista becslést is. Ha föld populációjának növekedése ebben az ütemben folytatódik,

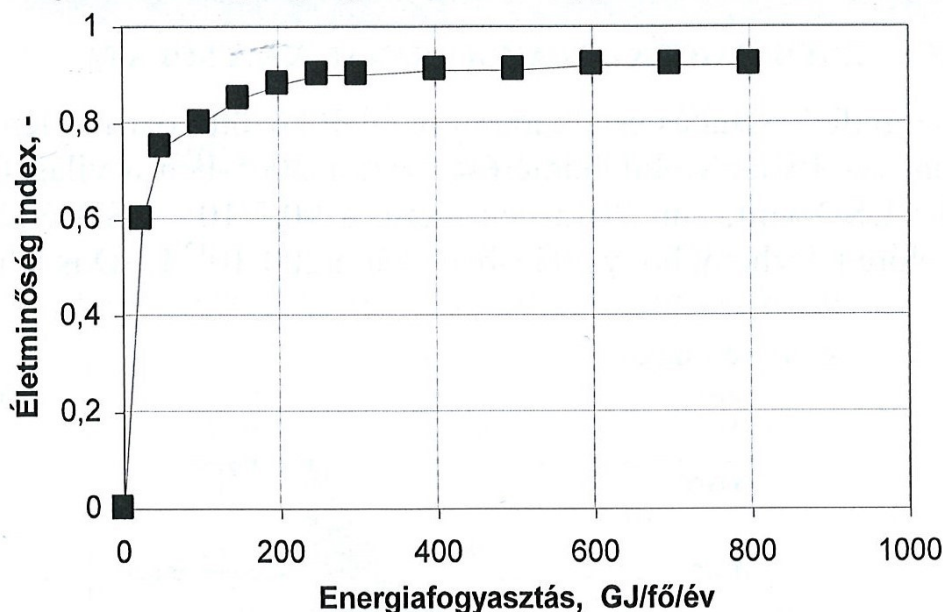
2050-ben a becsült 9,5 milliárd helyett 10–11 milliárd lesz a világ lakossága és ez a pesszimista előrejelzést látszik igazolni.



1. ábra

A világ népességének alakulása 2300-ig

A világ népességének alakulása szoros kapcsolatban van az energiaigény változásával. Ez az összefüggés lehetőséget ad arra, hogy csak a népesség alakulása alapján megbecsüljük a várható energiafogyasztást. A számítás alapja az életminőségi index és az egy személy éves energiaigényének összefüggése, ami a 2. ábrán látható.



2. ábra

Az életminőségi index függése a fajlagos energiafelhasználástól

A közölt adatok arra engednek következtetni, hogy jelenleg az átlagos energiaigény 60 GJ/év/fő, ami 0,6-0,7 életminőségi indexnek felel meg és ez jellemző a közepesen fejlett országok, többek között Magyarország lakosaira is. Ezzel szemben a fejlett nemzetgazdasággal jellemezhető országokban az egy személyre eső energia-

fogyasztás 200–800 GJ/év/fő attól függően, hogy az ország milyen régióban fekszik és milyen a szociális ellátórendszere. Nyilvánvaló továbbá, hogy a 0,9 feletti életminőségi index belső struktúrája különböző lehet, és ezért nagy különbség adódik a felhasznált energia mennyiségében.

A 2. ábra alapján lehetőség nyílik a várható energiaigény becslésére is. Ez a számítás azon az alapon tűnik logikusnak, hogy azokban a fejlődő országokban, ahol napjainkban gyakran 20–40 GJ/év/fő energiafogyasztás a jellemző (ez 0,4 alatti életminőségi indexnek felel meg), a belátható időtávlatban szintén szeretnének a fejlett országok életminőségével rendelkezni. Hőegyenértékkel számolva kimutatható, hogy amíg 2000-ben az energiaigény közel 400 EJ (10^{18} J) volt, 2030-ban a felhasználás ennek duplája, a század végére pedig a négyszerese, 1600 EJ is lehet az igen optimista számítás szerint (1. táblázat). Sajnálattal kell azonban megállapítanunk, hogy a legújabb adatok szerint a globális energiaigény már 2050-ben elérheti ezt az értéket, mint ahogy a népesség száma is meghaladja az optimális előrejelzés szerinti adatokat.

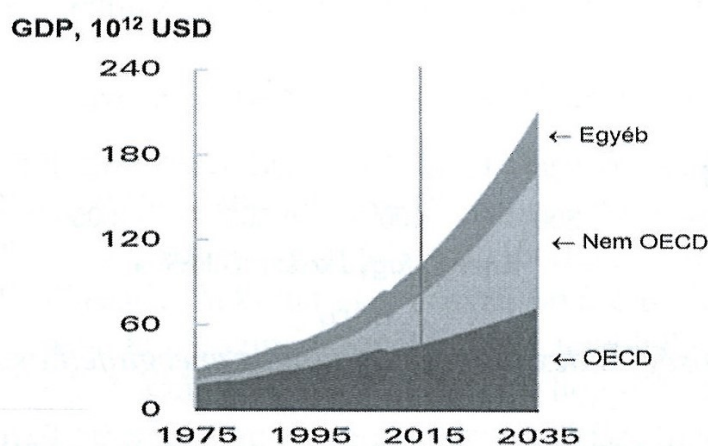
1. táblázat

A világ népesség, fajlagos energiafogyasztásának és a globális energiaigénynek az alakulása 2000-ben, illetve 2050-ben

Év	Népesség Mrd	Energiafogyasztás GJ/év/fő	Energiaigény EJ
2000	6	60	387
2050	8	200	1600

3. A GDP ÉS AZ ENERGIAIGÉNY ALAKULÁSÁNAK KAPCSOLATA

A globális energiafelhasználás és a kumulatív GDP között közismerten szoros kapcsolat áll fenn. Az ExxonMobil felmérése szerint 2005-ben a világ GDP-je még csak $36,3 \cdot 10^{12}$ USD volt, ami 2015-ben elérte a $90,5 \cdot 10^{12}$ USD értéket és nagy biztonsággal előre jelezhető, hogy 2035-ben akár a $200 \cdot 10^{12}$ USD is lehet (3. ábra).

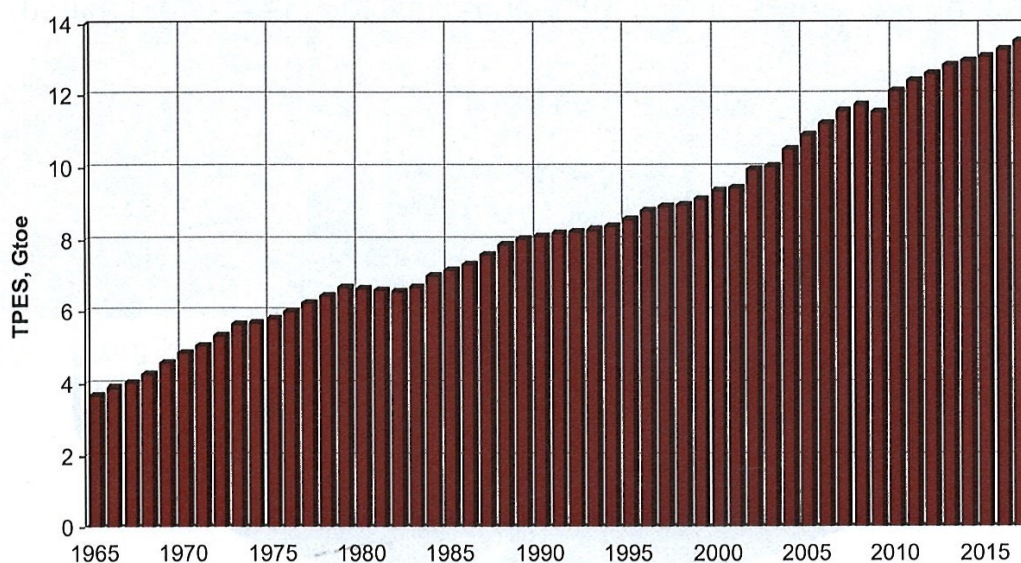


3. ábra

A GDP globális növekedése 1975 és 2035 között

A GDP-növekedés dinamikáját tekintve megállapítható, hogy 10–20%-ot a népesedés számszerű növekedésére, illetve 80–90%-ot az egy személy hozzájárulására/fogyasztására lehet visszavezetni. Jellemző továbbá, hogy amíg az OECD-országokban a GDP folyamatos, de mérsékelt növekedést mutat, addig a nem OECD-országok hozzájárulása mindkét elem vonatkozásában radikális lesz.

A felmérések lényegében azzal számolnak, hogy az átlagos éves növekedési ráta – a várható recessziók ellenére – közép- és hosszú távon nem csökken 2,8% alá. A jelzett változás a primer energiafelhasználás (Total Primary Energy Supply, TPES) arányos növekedését hozza magával. Jellemző, hogy amíg ez 1973-ban mindössze 6,1 Gtoe olajegyenértékkel volt egyenlő, addig 2017-re az igény 13,4 Gtoe-ra növekedett (4. ábra) és 2030-ban már 17,0 Gtoe felhasználás várható (2. táblázat és 5. ábra).



4. ábra

A TPES igény alakulása 1965 és 2017 között

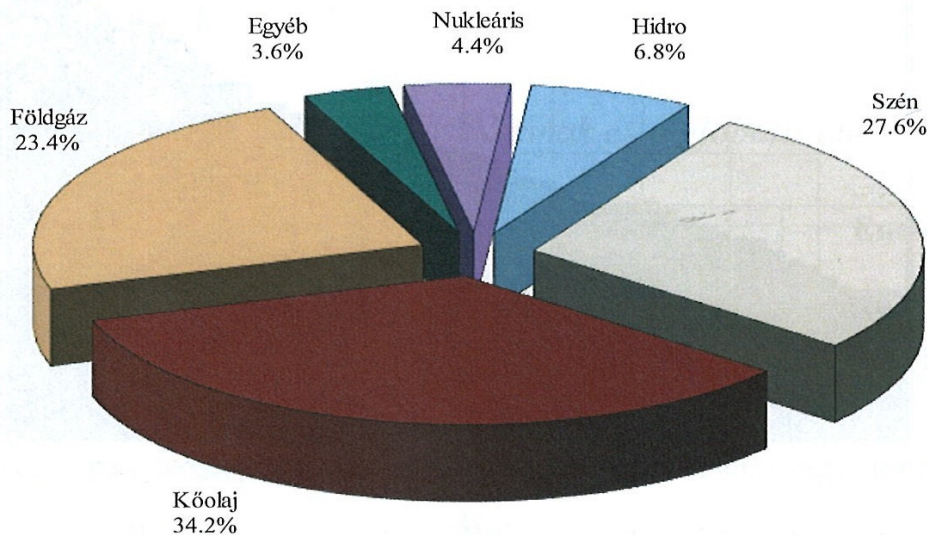
2. táblázat

A primer energiaforrások megoszlása a különböző időszakokban

Energiaforrás	Év			
	1973	2006	2017	2035
Szén, %	24,5	26,0	27,6	23,9
Kőolaj, %	46,1	34,4	34,2	29,4
Földgáz, %	16,0	20,5	23,4	26,7
Víz, %	1,8	2,2	6,8	7,8
Nukleáris, %	0,9	6,2	4,4	4,4
Egyéb*	10,7	10,7	3,6	7,8
Összesen, Gtoe	6,2	11,7	13,5	17,8

*Tartalmazza a megújuló és a hulladék eredetű energiaforrásokat

A primer energiaforrások összetételét tekintve az is kimutatható, hogy a globális GDP és a szénhidrogének, tágabb értelemben a fosszilis energiahordozók részaránya között szintén szoros korreláció van. Amint azt a 2. táblázat adatai bizonyítják a kőolaj-, földgáz- és szénfeleségek együttes aránya az elmúlt harminc évben alig változott és az előrejelzések szerint a jelenlegi helyzethez hasonló marad az elkövetkező három évtizedben is. A táblázat adatai alapján megállapítható az is, hogy a földgáz részaránya a vizsgált időszakban növekszik, míg a kőolajé kismértékben csökken. Az ellentétes változásra azonban jellemző, hogy együttes részarányuk az elmúlt évtizedekben és várhatóan a nem túl távoli jövőben az 50%-ot is tartósan meg fogja haladni. Ha a kőolaj és a földgáz felhasználáshoz a szén energiahordozóként a TPES-hez való hozzájárulását hozzászámítjuk, akkor nyilvánvalóvá válik, hogy bár a TPES 34,8%-kal várhatóan növekedni fog, de a fosszilis energiahordozók iránti relatív igény uralkodóan, 80%-ot meghaladó (14,4 Gtoe) marad.



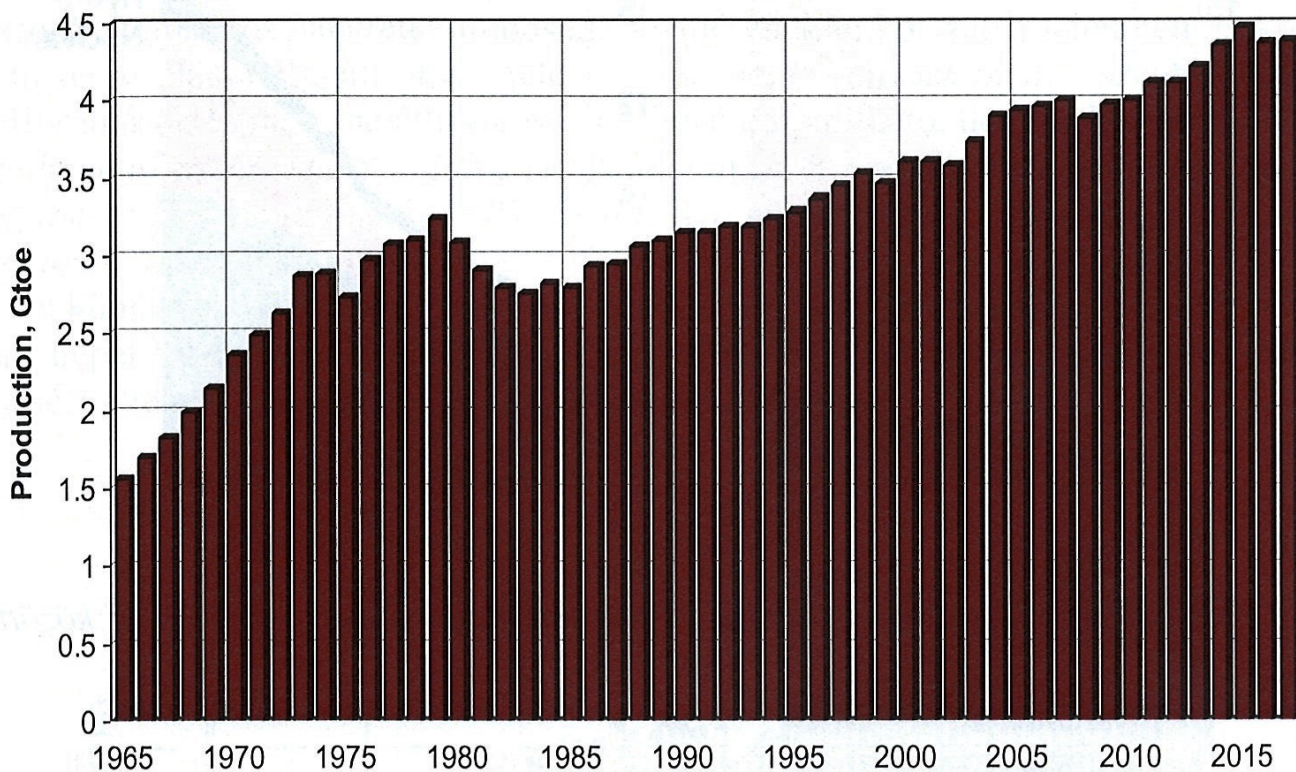
5. ábra

A TPES globális megoszlása 2017-ben

A közel 50 éves termelési trendeket figyelembe véve kimutatható tehát, hogy a GDP-, illetve a TPES-igény szerkezetét, az átmeneti globális gazdasági válságok marginálisan érintették. Legfeljebb az a jellemző, hogy a válságokra a kőolajtermelés érzékenyebben reagált, mint a földgáztermelés (6. és 7. ábra). Ez részben környezeti hatásokra, részben a vegyipari vagy a motorhajtó anyagok iránti igény időszakos változására vezethető vissza. Az energiafogyasztás szerkezetét vizsgálva megállapítható továbbá, hogy a korábbi adatokkal szemben a húzó ágazat nem a motorhajtó anyagok fogyasztása, hanem az ipari igény, ezen belül a petrokémia stratégiai fejlődése a meghatározó, bár a kommunális (fűtés/hűtés) fogyasztás meredek felfutása is szerepet játszik a globális energiaigény növekedésében (8. ábra).

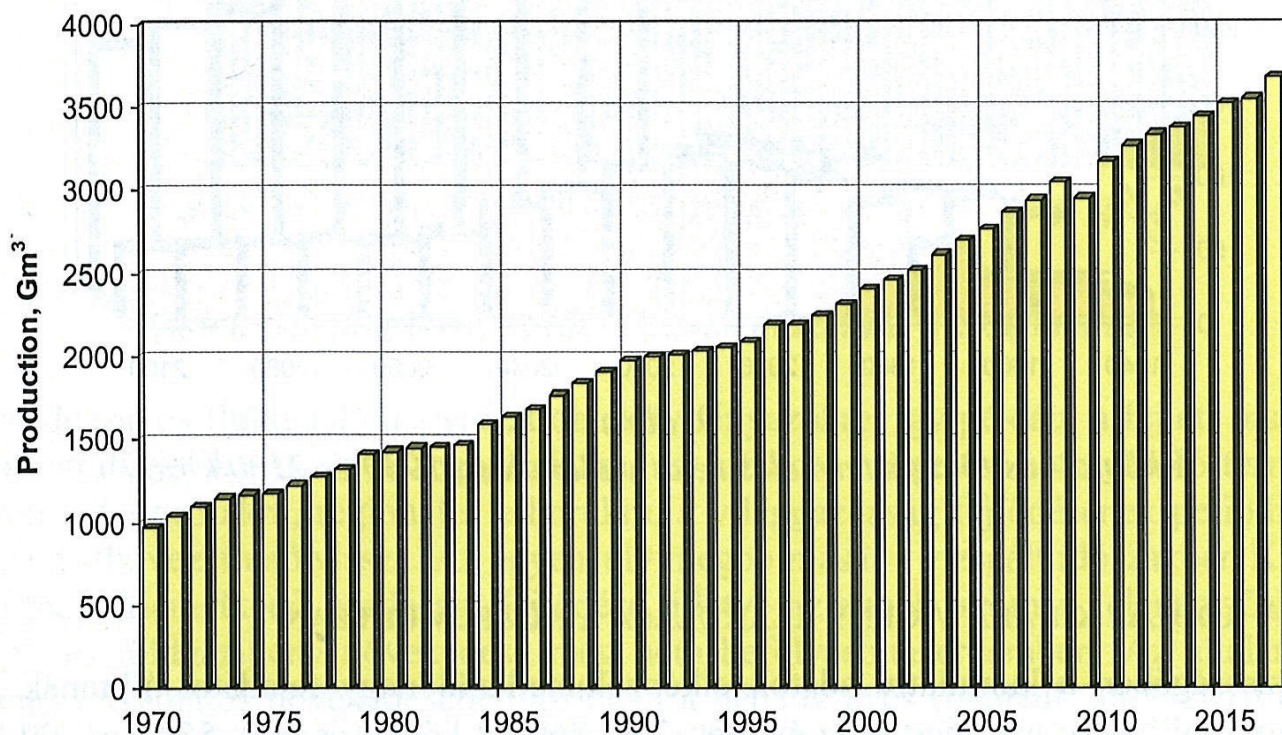
Bár a konvencionális fosszilis energiahordozók szerepe a hosszú távú, 2100-ig terjedő adatok szerint relatív értelemben jelentős mértékben csökkenni fog (pl. a kőolaj és a földgáz együttes aránya a század közepére 20%-ra, a század végére alig 15%-ra csökken), az abszolút volumen merőben új megvilágításba helyezi a szén-

hidrogének termelését és felhasználását. Ezek szerint, míg a század első évtizedében évente átlagosan 4,1 Gt kőolajat és 5 Tm³ földgázt termeltek ki, addig a század közepére 2,8 Gt olaj és 8 Tm³ földgáz felszínre hozása lenne kívánatos (9. ábra).



6. ábra

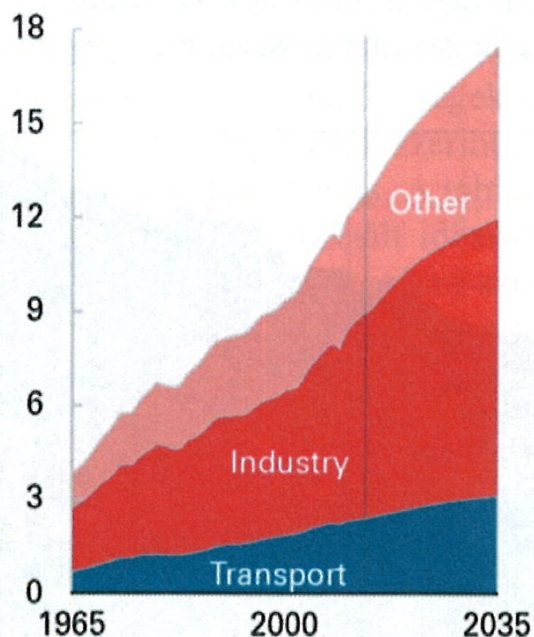
A világ kőolajtermelése 1965 és 2017 között



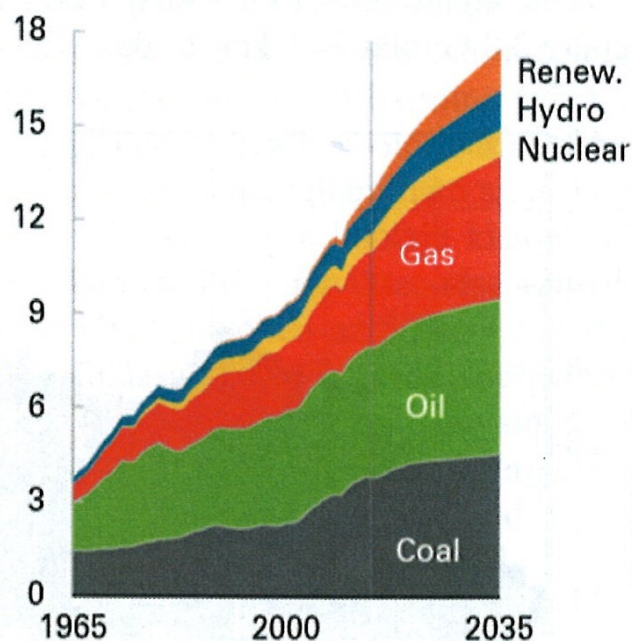
7. ábra

A világ földgáztermelése 1965 és 2017 között

Szektor szerinti fogyasztás, Gtoe

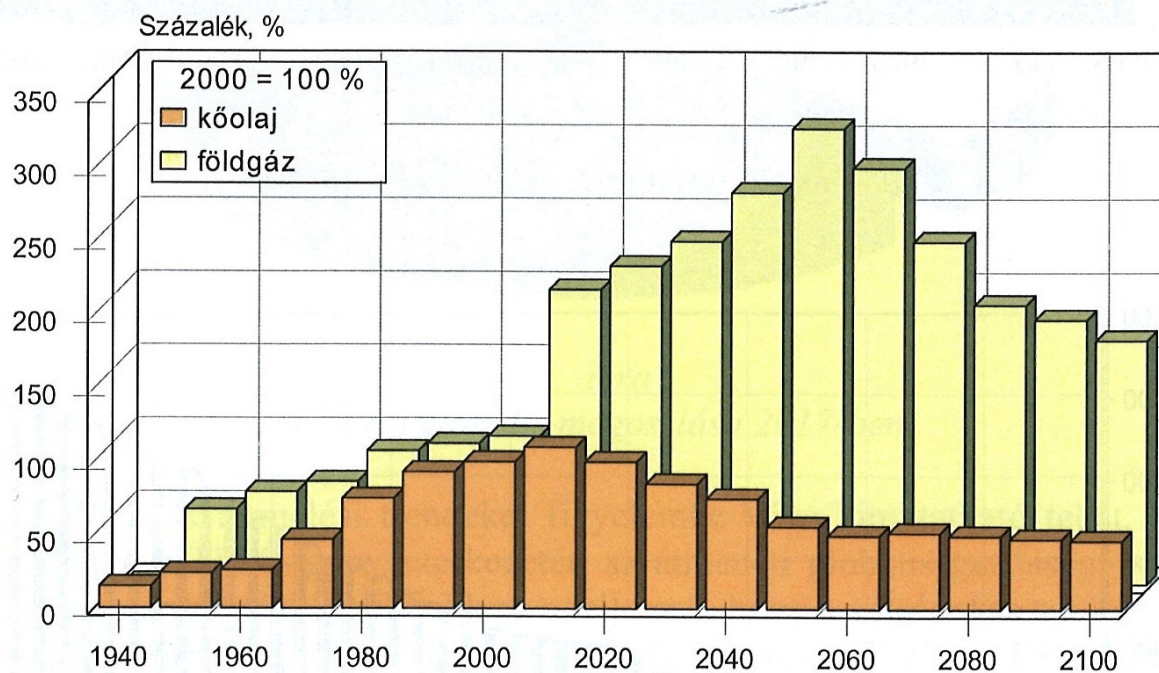


Energiahordozó szerinti fogyasztás, Gtoe



8. ábra

A TPES-igény szektor és energiahordozó szerinti megoszlása 1965 és 2035 között



9. ábra

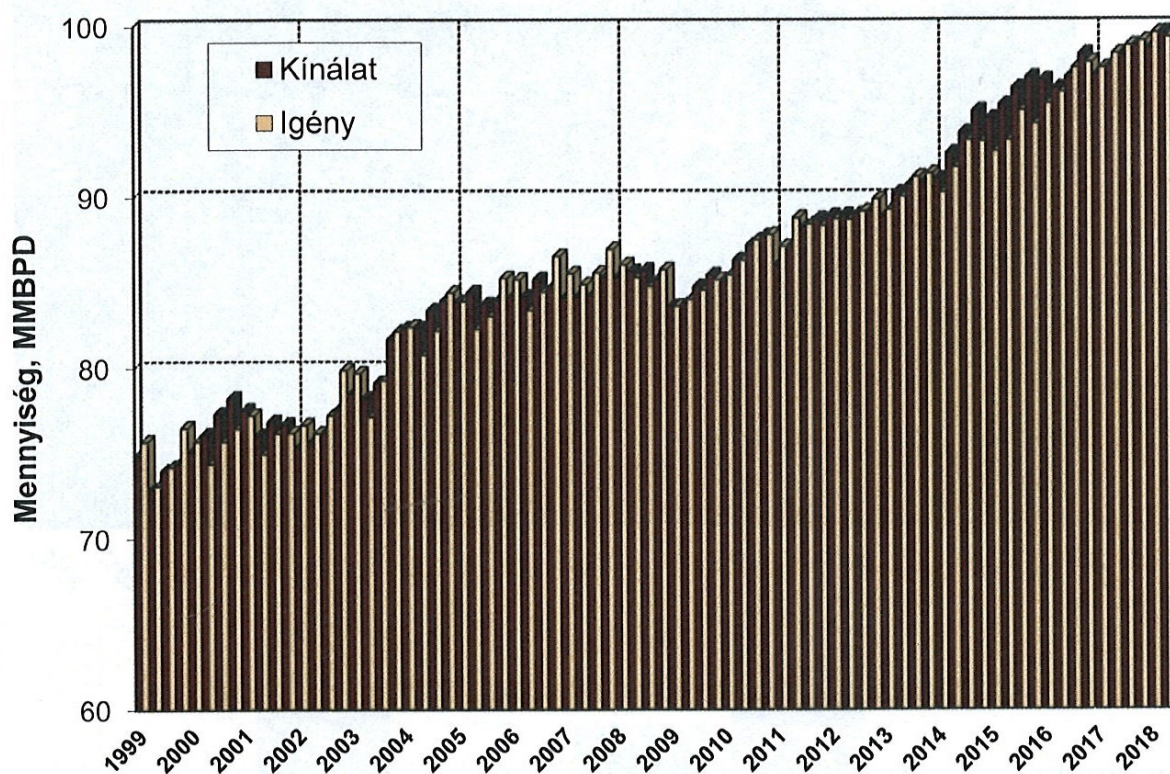
A kőolaj- és földgáztermelés relatív alakulása 1940 és 2100 között

4. A KŐOLAJ KÍNÁLAT/IGÉNY ALAKULÁSA A KÖZELMÚLTBAN

Össességében a kumulatív adatok elképzelhetetlenül nagy feladatot állítanak a kitermelői iparág elé, mert száz év alatt 250–260 Gt kőolaj és 500–550 Tm³ földgáz kitermelése valószínűsíthető. A várható nehézségeket, bizonyos értelemben kritikus helyzetet, jól illusztrálja, hogy a XXI. században egyrészt közel két és

félszer több kőolaj kitermelésére lesz szükség, mint az elmúlt 150 évben. Másrészt, figyelembe véve a 260 Gt várható termelést és a 380 Gt-ás készletet, a kitermelés hatásfokát a napjainkban jellemző 30–35%-ról 65–68%-ra kell növelni. Ez utóbbi a szénhidrogén-termelés legnagyobb kihívása már ma is, ami az elméleti és műszaki földtudományos ismeretek minőségi bővülésének új korszakát jelentheti, miközben nagy biztonsággal előre jelezhető a nem konvencionális szénhidrogén-előfordulások termelésbe állítása is. Túlzás nélkül állítható, hogy *a közeljövőben a fluidumbányászat interdiszciplináris tudományában paradigmaváltásra lesz szükség, ami a kutatás-fejlesztés területén elméleti, módszertani és alkalmazástechnikai megújulással egyenértékű.*

A kőolajtermelés és -felhasználás globális egyensúlya látszólagosan megnyugtató képet mutat. Amint az a 10. ábrán látható, a kínálat/igény kisebb-nagyobb eltéréstől tekintve általában egyensúlyban van.

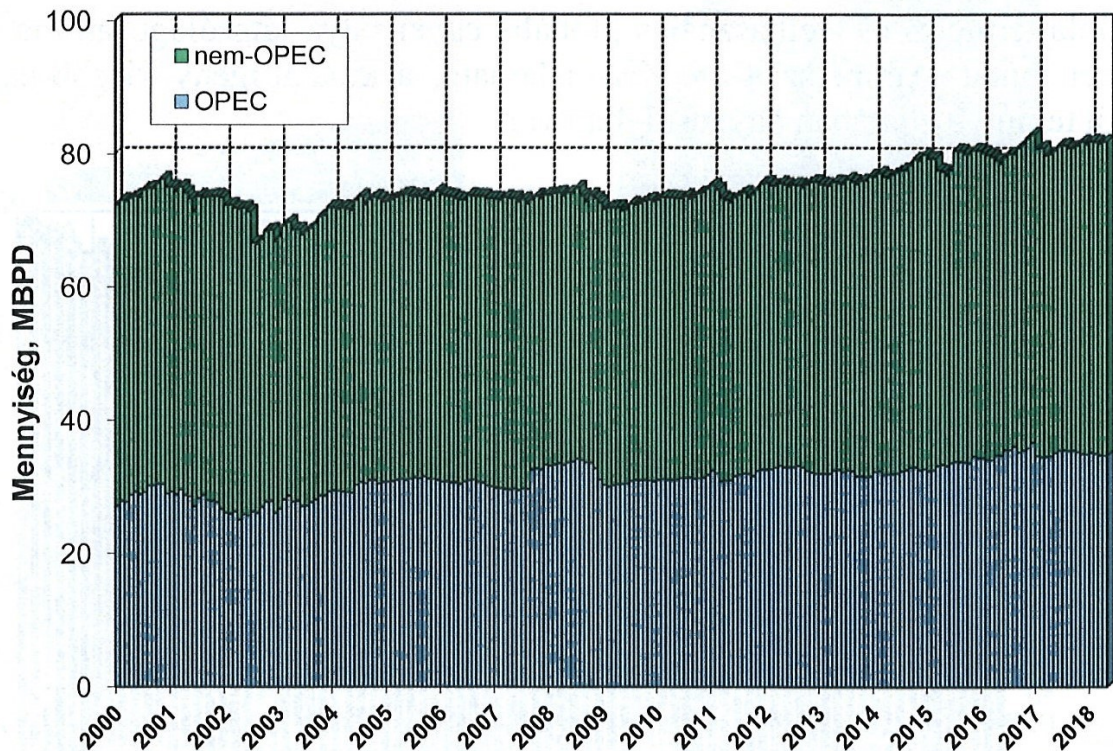


10. ábra

A kőolaj kínálat/igény egyensúlyának alakulása a közelmúltban

Az időszakos fluktuáció nagyrészt objektív tényezőkre, így például a fejlett országok stratégiai készletének ingadozására, az offshore termelést befolyásoló természeti katasztrófákra, regionális háborúkra, a világgazdaság fejlődésének periodicitására stb. vezethető vissza. Az egyensúly megbomlását a vizsgált időszakban Kína és India kiemelkedő gazdasági fejlődése, illetve az ennek nyomán jelentkező kőolaj- és földgázigény növekedése még nem befolyásolta érdemben. Az általános trend folyamatos növekedésében azonban a néhány éves (például 2008–2010 között) visszaesés háttérében a gazdasági válság hatása jelentkezett. Másfelől, 2015 és 2017 között túltermelési válság volt, ami a készletek felhalmozódását hozta magával. Ezt az OPEC-országok a termelés visszafogásával igyekeztek kompenzálni,

és ez az egyensúly visszaállítását eredményezte annak ellenére, hogy a termelés visszafogását célzó döntést az embargótól megszabadult Irán nem volt hajlandó végrehajtani. Általánosságban kijelenthető, hogy az egyensúly pozitív vagy negatív megbomlását az OPEC-országok termelésének $\pm 5\%$ -os módosításával mindig sikerült helyre állítani. Igaz ez annak ellenére, hogy a napi termelés 60%-át a nem OPEC-országokban, többnyire az előrehaladott letermelési állapotban, ún. „brown” mezőkről hozzák a felszínre, míg az összehasonlíthatatlanul nagyobb vagyonnal és készletekkel rendelkező OPEC-országok hozzájárulása a termeléshez 40% körül ingadozik (11. ábra).



11. ábra

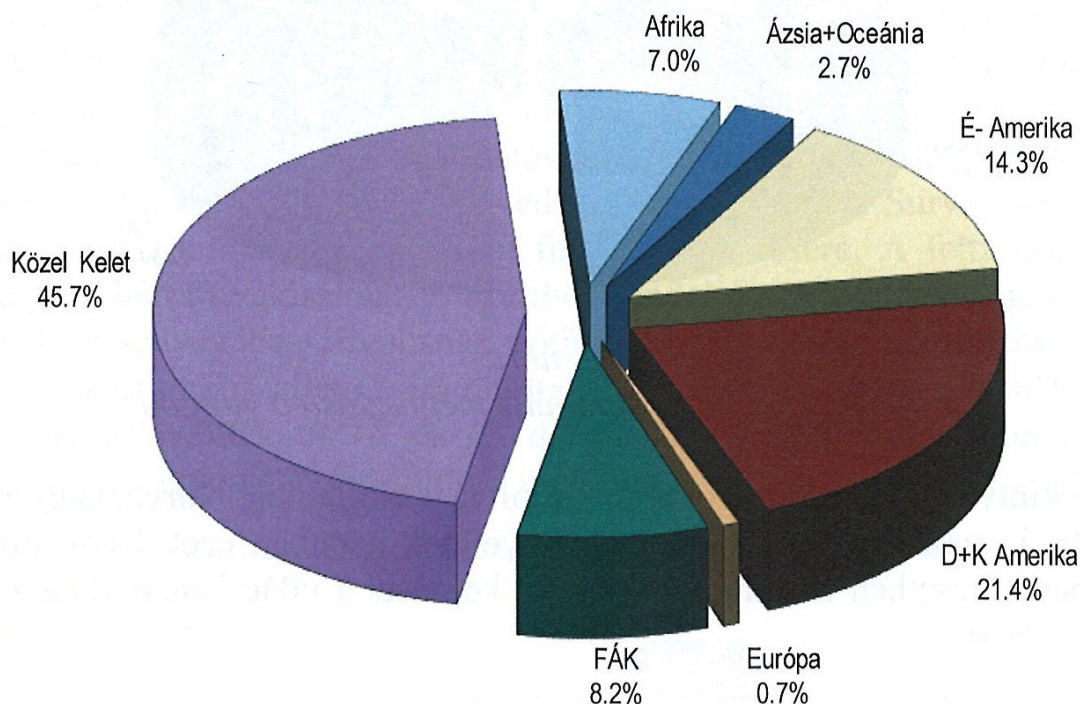
A világ napi olajtermelésének alakulása a közelmúltban

Az itt közölt kiegyensúlyozott kínálat/igény, illetve termelés/fogyasztás azonban látszólagos és a továbbiakban ismertetésre kerülő adatok a bevezetőben idézett súlyos aggodalomra adnak okot.

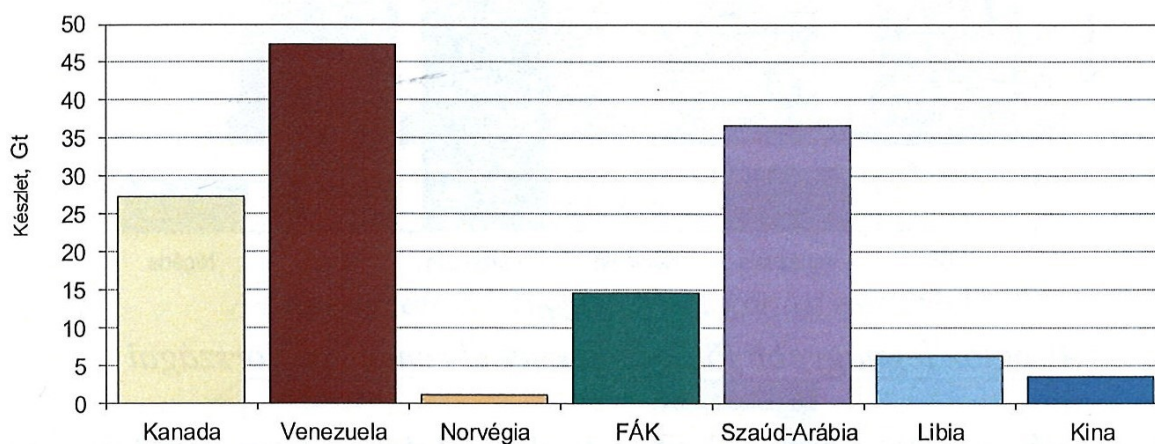
5. A KŐOLAJ- ÉS FÖLDGÁZKÉSZLETEK ALAKULÁSA A VILÁGON

A termelés/fogyasztás egyensúlyba hozása alapvetően két módon lehetséges: a földtani vagyon növelése, azaz eredményes feltérési tevékenység révén és a megkutatott szénhidrogének kitermelési határfokának javítása, azaz az ipari készlet növelése útján. A kitermelhető földtani készletek nagysága, elhelyezkedése, a tároló formációk minősége, szerkezete stb. vonatkozásában azonban összetett kép a jellemző. A bizonyított kőolajkészletek regionális eloszlásából (12. ábra) nyilvánvaló, hogy a Közel-Kelet országai, amelyek meghatározói az OPEC-termelésnek is, kiugróan nagy készletekkel rendelkeznek. Összességében tehát, a világ kumulatív olajkészlete 239,3 Gtoe volt 2017-ben, amiből meghatározó mértékben Szaúd-

Arábia kőolaj-, Venezuela nehézőolaj- és a Kanada olajhomokkészletei rendelkeztek (13. ábra). Ezzel szemben Európában az Északi-tenger és Kína offshore készlete, illetve Líbia sivatagi területen elhelyezkedő és a jelenlegi technológiai színvonalon kitermelhető készletei marginálisak.

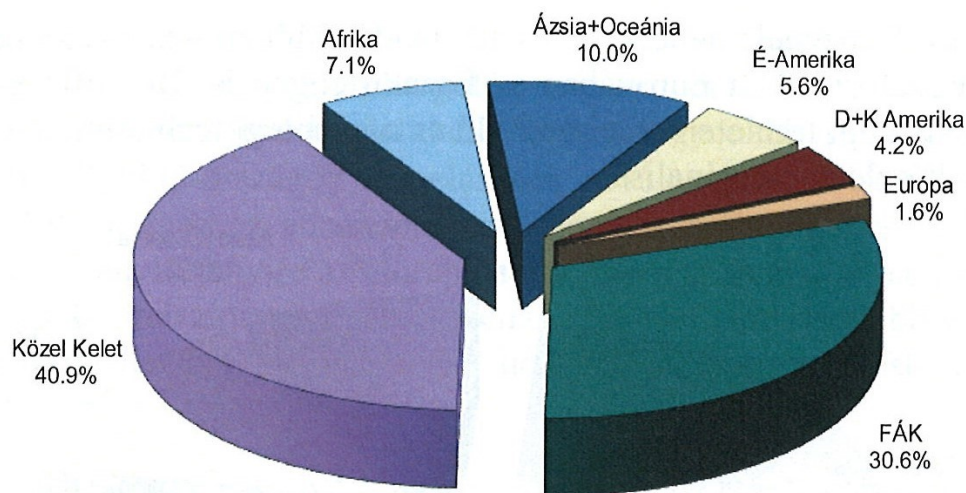


12. ábra
A készletek regionális eloszlása



13. ábra
A régiók legnagyobb kőolajkészlettel rendelkező országai

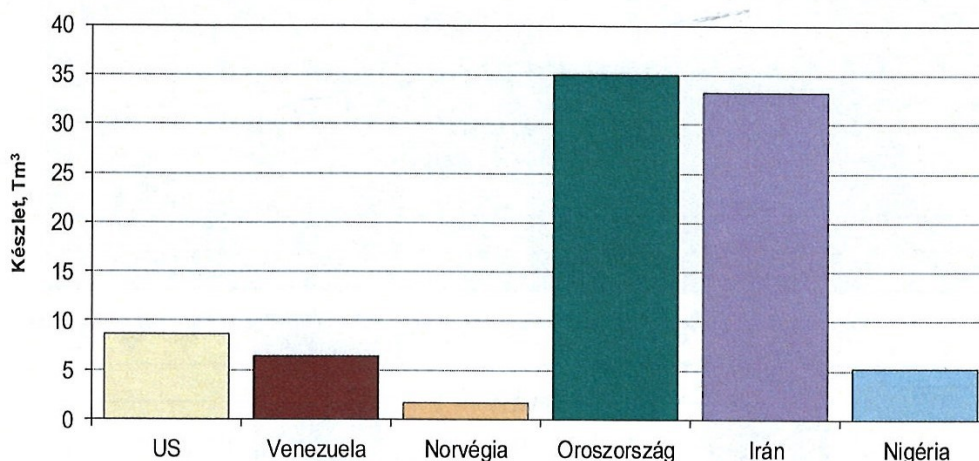
Európában a jelentősebb olajtermelő országok közül kiemelkedik Norvégia és az Egyesült Királyság, azonban a jelenleg ismert kumulatív európai készlet mindössze alig valamivel több, mint 1,7%-a a világ globális készletének. Sajnos, a földgáz-készleteket tekintve is hasonlóan diszproporcionális az eloszlás. Bár, a világ összes készlete 193,5 Tm³, a 14. ábra tanulsága szerint a jelentős készletek szintén a Közel-Keleten (Iránban és Katarban), illetve Oroszországban találhatóak, míg az egyéb régiók potenciálja nem számottevő.



14. ábra

A földgázkészletek regionális megoszlása a világon

Európát tekintve – Oroszországot nem számítva – Hollandia, Norvégia és az Egyesült Királyság gázkészletei érdemelnek figyelmet, azonban ezek összesített volumene ebben az esetben is mindössze 3%-ot képvisel a világ ismert földgázkészletében (15. ábra).

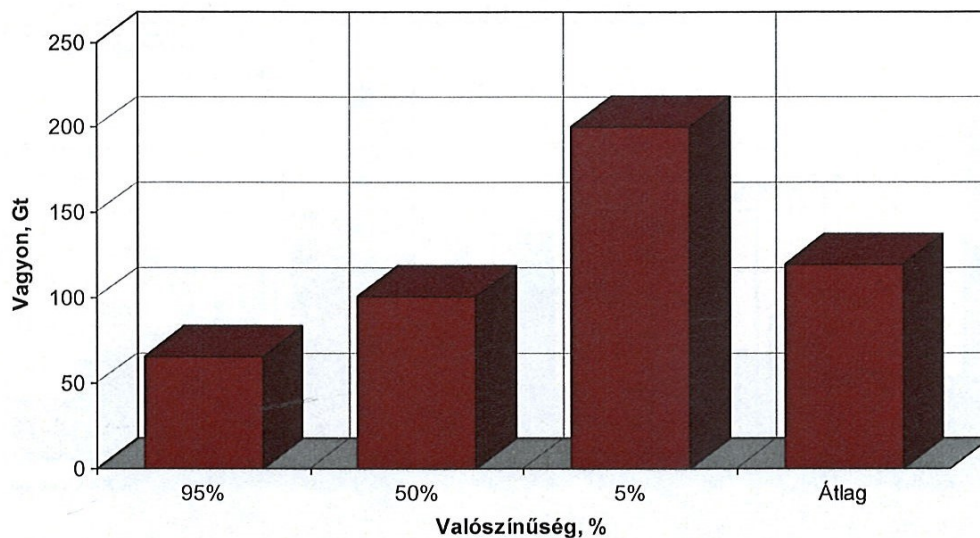


15. ábra

A régiók legnagyobb földgáz készlettel rendelkező országai

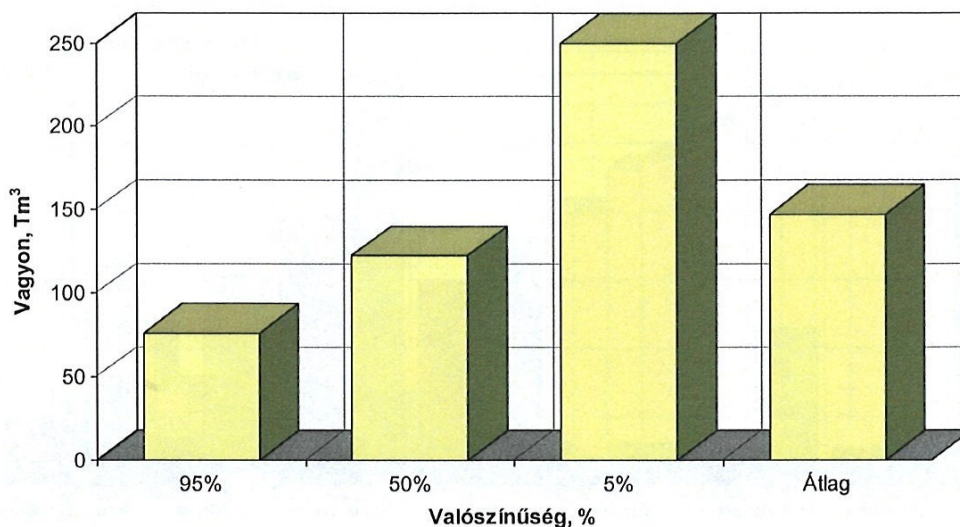
Kiindulva abból a széles körben elfogadott előrejelzésből, hogy mind a kőolajtermelést, és még fokozottabb mértékben a gáztermelést az évszázad végéig a korábbiakhoz képest meg kell többszörözni, a feltárási tevékenység kiszélesítéséhez és a találati valószínűség növeléséhez meghatározó globális érdek fűződik. A távlati perspektívát azonban beárnyékolja, hogy bár az elmúlt két évtizedben a fajlagos feltárási költség radikálisan 21 \$/bbl-ről 6 \$/bbl-re csökkent, a tevékenység eszköztárában megjelenő korszerű geofizikai, geokémiai, geológiai, földtani 3D és 4D szimulációs módszerek ráfordításai meredeken emelkednek. Ezen túlmenően a világ „megkutatottságának” szintje mind horizontális (területi), mind vertikális (mélységi) vonatkozásban növekszik, ami a kőolaj esetében például a készletnövekedés korábbi $1,5\text{--}2,0 \cdot 10^9$ bbl/év (2003-ban kiemelkedő $4,8 \cdot 10^9$ bbl/év) szintjét nagy valószínűséggel csökkenteni fogja. Nem ad optimizmusra okot, hogy 2016/2017

évekre vonatkozóan a kitermelhető olajkészlet 240,7 Gt-ról 239,3 Gt-ra, azaz 1,4 Gt-val csökkent, miközben a termelés volumene 4,387 Gt volt. A földgáz vonatkozásában a hasonló adatok szintén a kitermelhető készletek csökkenését jelzik, amennyiben az ipari készlet 193 Tm³-ről 0,4 Tm³-rel 193,5 Tm³-re nőtt, de a termelés volumene 2017-ben 3,681 Tm³ volt. Ezek a sokoldalúan alátámasztott adatok (BP Annual Statistical Review, IEA World Energy Outlook) parancsolóan felhívják a figyelmet a feltérési tevékenység fokozására, a kitermelési határfok javítására és a szénhidrogénekkel történő takarékosagra. Ami a mező kutatást, illetve a potenciálisan várható esélyeket illeti, egyedül a US Geological Survey tett korábban figyelemre méltó erőfeszítéseket az új források becslésére. A feltárandó (yet-to-find) vagyont három valószínűségi szinthez rendelték. A csaknem biztos találatot 95%-osnak, a lényegében irreálisnak tekinthetőt 5%-osnak tekintették. A kapott adatokból logaritmikus átlagot számítottak és ezt, mint potenciálisan legvalószínűbb értéként közölték. A 16. és 17. ábrán látható átlagérték kőolaj esetében a még feltárandó vagyon 156 Gt, földgáz esetében 147 Tm³.



16. ábra

A reménybeli feltérési esélyek kőolaj esetében

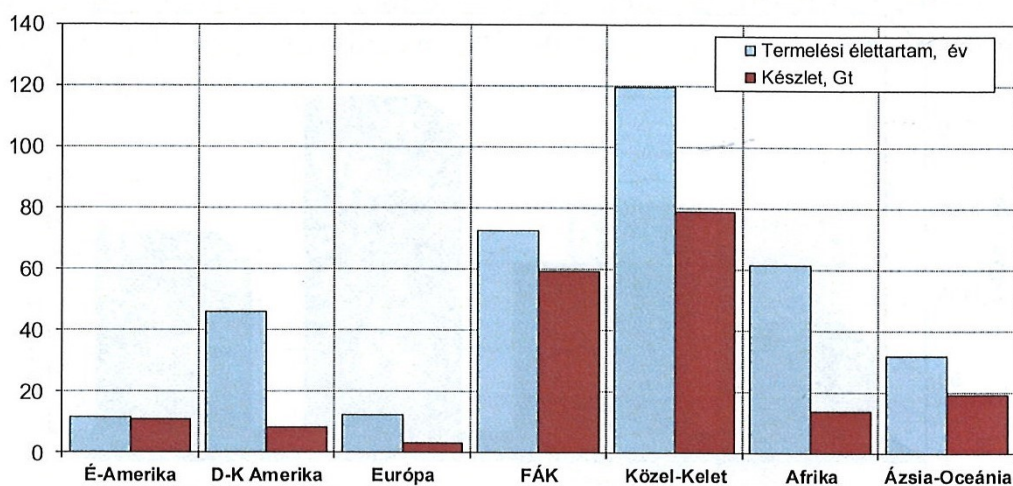


17. ábra

A reménybeli feltérési esélyek földgáz esetében

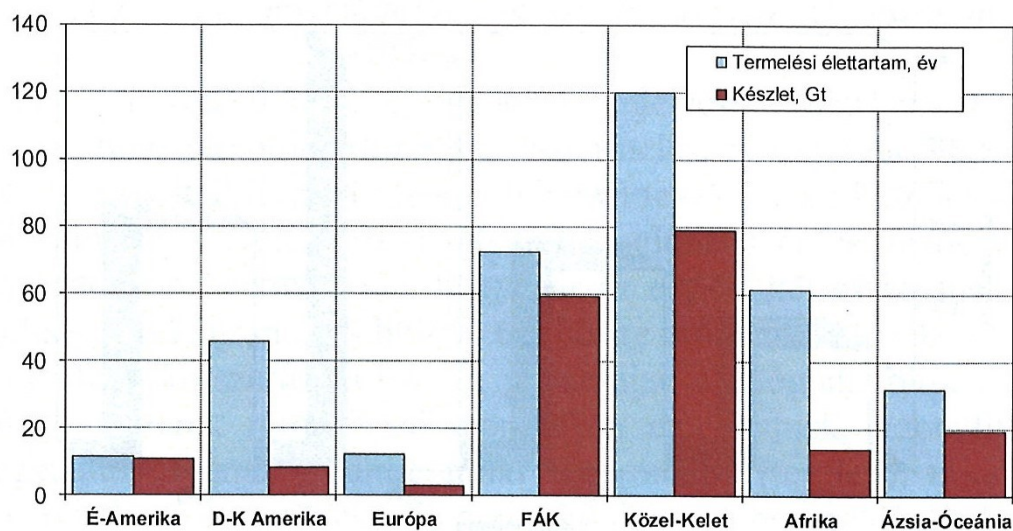
Az iparág jelenlegi technológiai szintjén ez a vagyonnövekedés kőolaj esetében 50%-os, a földgáz esetében 90%-os készletnövekedést jelenthet. A jelenlegi éves kitermelési volumeneket tekintve ezzel a kőolajtermelés élettartamát közel 20, a földgáztermelés élettartamát 35 évvel lehetne meghosszabbítani.

A készletek és a reménybeli vagyon áttekintése szorosan kapcsolódik ahhoz a kérdéshez is, hogy mennyi a szénhidrogének jelenleg számított termelési élettartama. Erre vonatkozóan mind pesszimista, mind optimista előrejelzések merülnek fel időnként. Jellemző, hogy már a múlt század elején is borúsán, a készletek gyors kimerülését aposztrofálták amerikai szakértők. Ami a jelenlegi bizonyított készletek és az évi termelési adatok alapján előre jelezhető a kőolaj esetében 50,2 év, földgáz esetében 52,6 év. Ezen adatok háttérében azonban igen nagy különbségek vannak az egyes régiók és országok között. Az általános képet torzítja, hogy kis készlet esetén is lehet hosszú élettartam, ha a termelési volumen marginális és fordítva (18. és 19. ábra). Ennek jellegzetes példája Venezuela, ahol a gáztermelés várható élettartama több mint 400 év!



18. ábra

A kőolajtermelés élettartama és készletének megoszlása az egyes régiók között

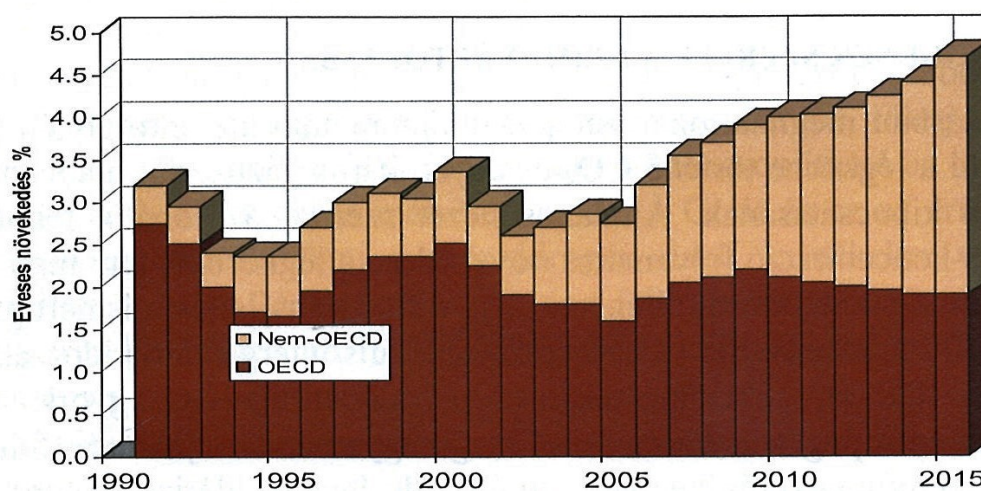


19. ábra

A földgáztermelés élettartama és készletének megoszlása az egyes régiók között

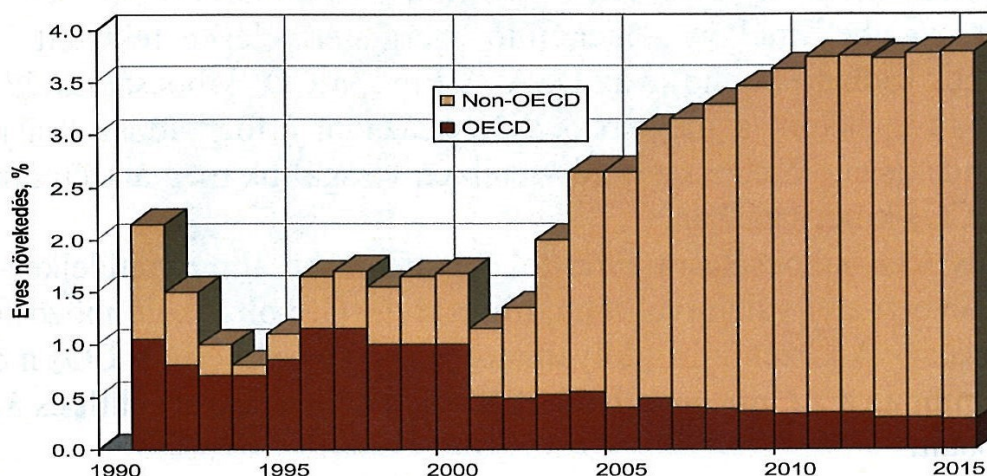
6. A SZÉNHYDROGÉN FELHASZNÁLÁS INTENZITÁSA

Az energiafelhasználás növekedésének motorja az elmúlt évtizedekben az ázsiai országok voltak. Ebben élenjáró volt Kína, India és Pakisztán. Ennek a folyamatnak a háttérében a fejlett országok azon megvalósult szándéka volt, hogy az energiaigényes és környezetszennyező technológiákat ebbe a régióba és országokba célszerű áthelyezni. Ennek tipikus esete volt a bányászati és kohászati termelés csökkentése, megszüntetése az európai országokban. Nem véletlen, hogy a vas- és acélgyártás területén ma Kína és India a világ vezető hatalmai közé tartozik. Ennek ellentétéként, a nagy hozzáadott értéket jelentő fejlesztések és gyártások a mikroelektronika, informatika, és robotika központjai az OECD-országokban maradtak és ez lényegesen kisebb fajlagos energiaigénnyel is járt. A tanulmány elején részletesen elemeztük, hogy az elmúlt időszakban a világon megtermelt GDP folyamatosan és lényegesen növekedett. A növekedés szerkezetében azonban figyelemre méltó változás állt be. Amint az a 20. ábrán látható, a nem OECD-országok hozzájárulása a GDP növekedéséhez ma már meghaladja az 50%-ot, ami értelemszerűen ezeknek a régióknak és országoknak a felhasznált többlet-energiaigényében is döntő módon megjelent (21. ábra).



20. ábra

Az OECD- és nem OECD-országok hozzájárulása a GDP növekedéséhez



21. ábra

Az OECD- és nem OECD-országok hozzájárulása a TPES növekedéséhez

Sajnos, a többlet-energiaigényben a szénhidrogének relatív aránya változatlanul 50% feletti, és a fosszilis energiahordozók aránya is 70–80% között maradt. Az ide vonatkozó számítások azonban igazolták, hogy az elvégzett fejlesztések, a takarékosagra ösztönző lépések ellenére az energiafelhasználás hatékonysága a nehéziparban igen alacsony szinten van ma is. Az energiaigényes technológiák széles körű alkalmazása miatt az energia intenzitására jellemző mutatók a két országcsoportban az alábbiak voltak még a jelen évtizedben is:

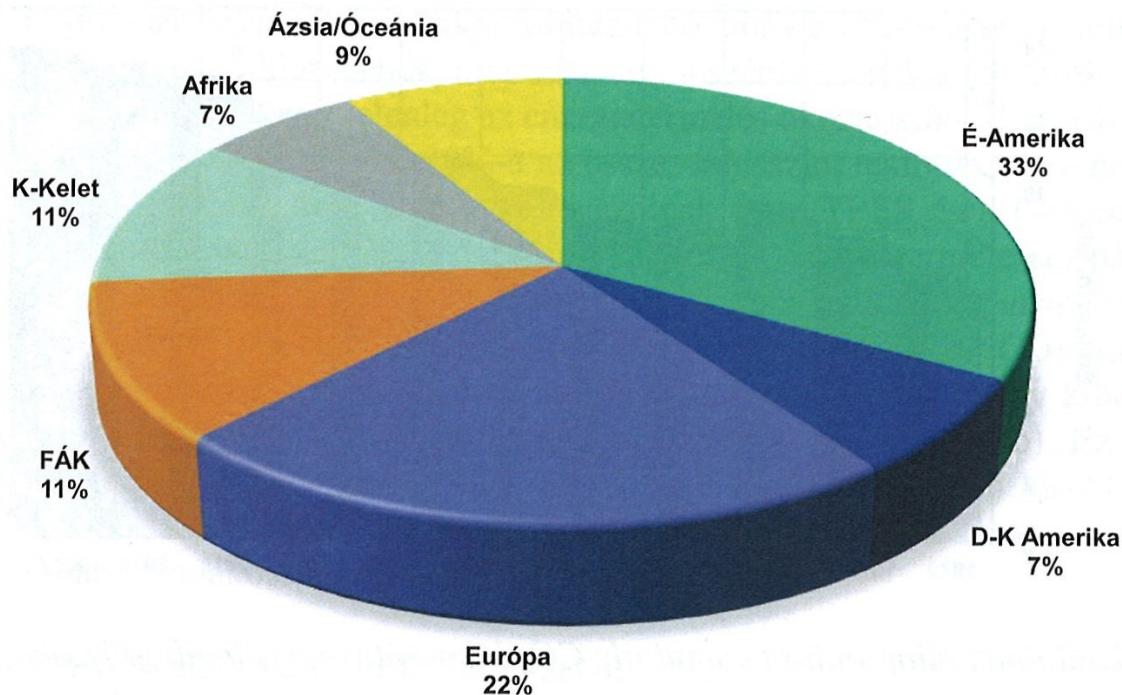
OECD-országok:	1,4 boe/1000 USD
Nem OECD-országok:	4,4 boe/1000 USD

A fenti adatok azt bizonyítják, hogy egységnyi GDP (1000 USD) megtermeléséhez a gyorsan fejlődő, nem OECD-országokban ma is átlagosan háromszor annyi energiát (barrel olaj egyenértéket, boe) használnak fel, mint az OECD-országokban. Mellesleg, ennek káros környezeti hatása, például a többlet CO₂-emisszióban szintén markánsan jelentkezik. Bár, az utóbbi években az energiaintenzív technológiákba is mérhető javulás figyelhető meg, de a gyártástechnológiákban a felhasznált energia egy bizonyos pont alá nem csökkent.

7. SZÉNHYDROGÉNEK SZEREPE A KLÍMAVÁLTOZÁSBAN

A klímaváltozásban meghatározó szerepet tulajdonítanak az antropogén hatásoknak, azon belül a légkörbe történő CO₂ és egyéb káros gázok, sőt újabban a nanoméretű korom kibocsátásának. Általános nézet szerint, a globális felmelegedés okozója a CO₂-koncentráció folyamatos növekedése a légkörben, ami mára meghaladta a 400 ppm értéket. Annak ellenére, hogy a föld éghajlatában ismert periodicitás van, és a 400 millió évente bekövetkező glaciális/interglaciális időszakok egymást követik, a földi átlagos hőmérséklet utóbbi időben tapasztalt gyors változását nagyrészt csak antropogén hatással lehet megmagyarázni. A jelenség felismerése számos egyezmény megkötéséhez vezetett (Rio de Janeiro, Párizs, Tokió), de még komoly erőfeszítéseket kell tenni a globális felmelegedés korlátozására, megállítására, a max. 2 °C fokos emelkedési határ betartására. Az egyezmények már 2014-ben is érzékelhető eredményre vezettek. Így pl. a CO₂-emisszió ≈32 Gt-ás értéken stabilizálódott, egyebek mellett a megújuló energiatermelésbe fektetett 270 Mrd USD-nak. Ennek tudható be, hogy az USA és Európa CO₂ kibocsátása 27 év alatt csaknem 30%-ra csökkent a megelőző, XX. századot átfogó időszakra jellemző 100%-ról. Mindezeket előrebojtva részleteiben vizsgáljuk meg a szénhidrogének felelősségét a CO₂-kibocsátásban.

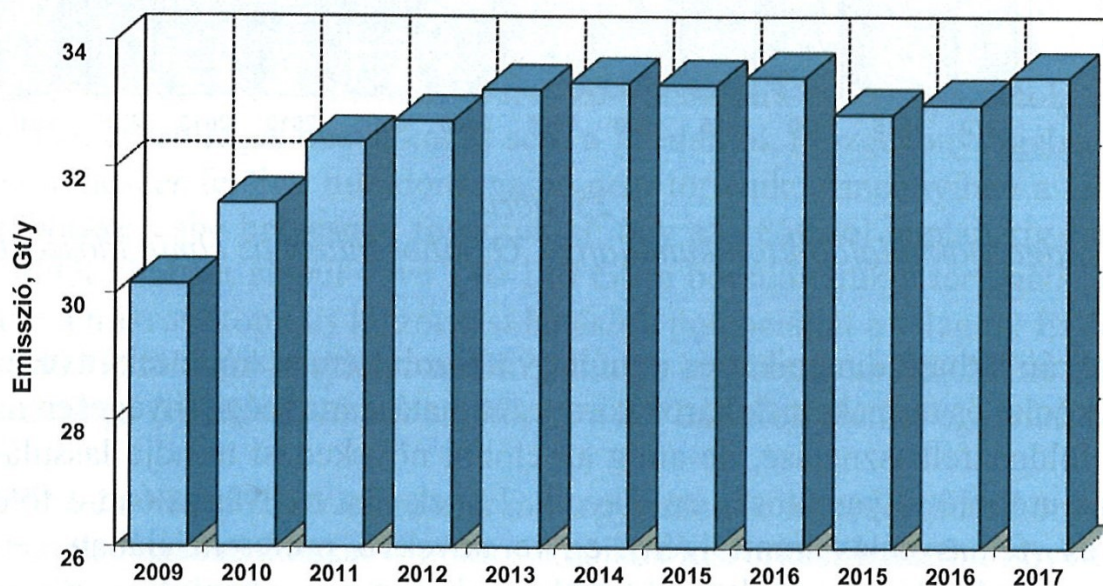
A kumulatív CO₂-kibocsátásra 1965-től folyamatosan állnak rendelkezésre adatok. Ebben az évben alig valamivel több, mint 11,18 Gt volt a különböző forrásból származó emisszió. A közelmúltig folyamatos volt a légkörbe jutó CO₂ mennyisége, azonban amint az a 22. ábrán látható 2012-től a növekedés megállt és 32–34 Gt között állandósult.



22. ábra

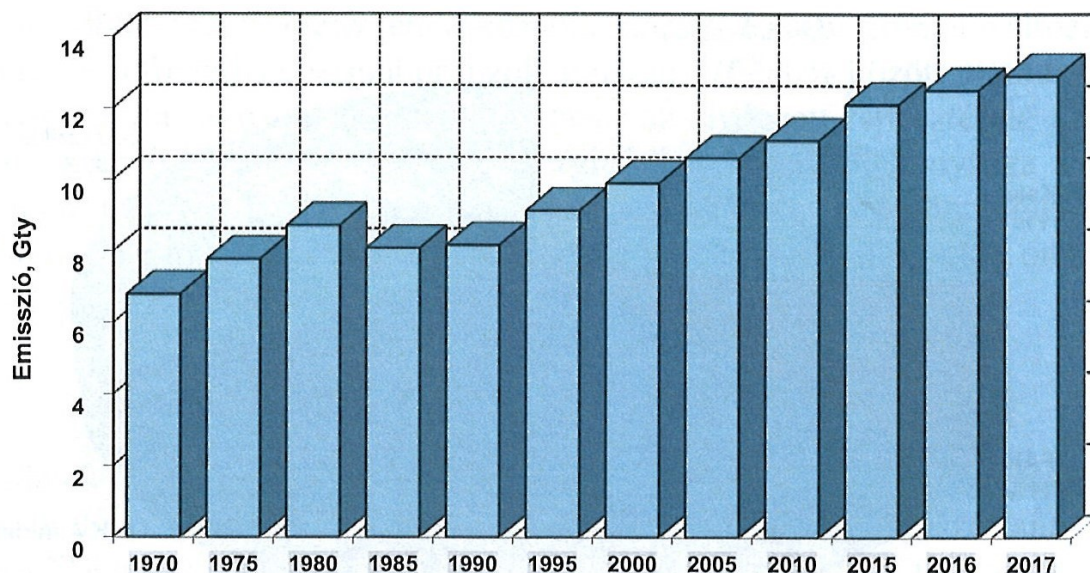
A világ kumulatív CO₂ kibocsátása az elmúlt időszakban

A 23. ábra adatai arra utalnak, hogy 2017-ben a legnagyobb kibocsátó: Észak-Amerika, lényegében az Egyesült Államok, valamint Európa, főleg a fejlett országok. Ázsia kumulatív emissziója jelenleg nem összehasonlítható az említett régiókkal, azonban Kína kibocsátása már eléri az évi 1 Gt-át és ez az érték évi 7%-kal folyamatosan emelkedik. Ami a szénhidrogén-alapú termékekre vetíthető CO₂-emissziót illeti, a 24. és 25. ábrán a kőolaj és a földgáz használatára visszavezethető kibocsátás trendje látható az 1970–2017 évek közötti időszakra. A két változást összehasonlítva megállapítható, hogy minkét esetben hasonlóan, közel 6 Gt-val nőtt a kibocsátás 47 év alatt.



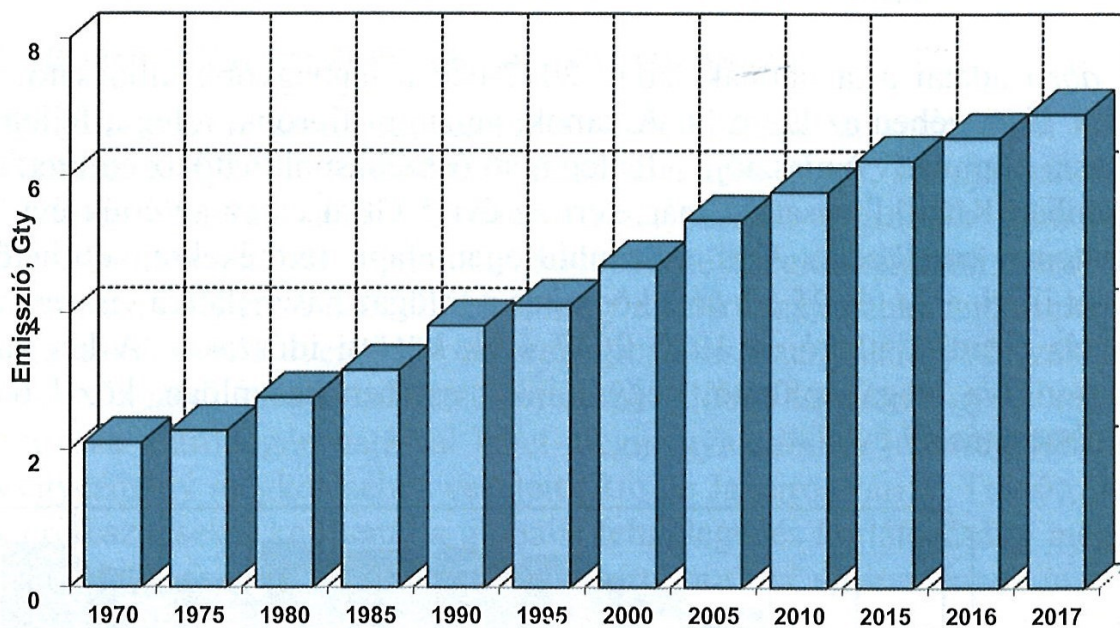
23. ábra

A CO₂-emisszió regionális eloszlása



24. ábra

A kőolajnak tulajdonított kumulatív CO₂ kibocsátása az elmúlt időszakban



25. ábra

A földgáznak tulajdonított kumulatív CO₂ kibocsátása az elmúlt időszakban

A két ábrán látható dinamikát és a múlt év abszolút emisszióját tekintve jellemző, hogy a kőolaj és termékeinek káros környezeti hatása ma még lényegesen nagyobb, mint a földgázfelhasználásé, de amíg az előbbi növekedési trendje lassulást jelez, addig az utóbbié folyamatosan emelkedik. Ennek oka nyilvánvalóan a földgáztermelés és -felhasználás iránti igény egyre növekvő preferenciájában keresendő. Összegezve a kőolaj és a földgáz okozta káros hatást arra a korántsem megnyugtató eredményre jutunk, hogy a 19,55 Gt CO₂-emisszióért a fluidum energiahordozók felelősek. Ha ehhez hozzászámítjuk a szénfeleségek használatát, ami közelítően a

13 Gt CO₂-kibocsátásért felelős, akkor kimutatható, hogy az atmoszférába jutó széndioxid 60%-áért a szénhidrogének, míg 40%-áért a szénfeleségek a felelősek. Fontos megjegyezni azonban, hogy jelenleg az energiatermelés okozta kibocsátás közelítően csak 10 Gt, azaz kevesebb, mint 30%-a az összes emissziót tekintve. Az előrejelzések azonban legalább három alternatívát vázolnak fel a TPES és a CO₂-emisszió között. A jelenlegi, pesszimista számítások szerint az energiatermeléssel párhuzamosan a CO₂ kibocsátás is növekedni fog. Az ún. *New Policy Scenario* szerint a TPES növekedési üteménél kisebb mértékben növekedhet a CO₂-emisszió. Az optimista becslés szerint a progresszív TPES-növekedés degresszív kibocsátás mellett valósulhat meg a 2020–240 közötti időszakban (450 Scenario). Ez utóbbi esetben is olyan fejlesztéseknek van prioritása, amelyek lényegesen kisebb, vagy nulla CO₂-emissziót eredményeznek nemcsak az energiatermelés, hanem a motorizáció, az ipari és a lakossági felhasználás területén.

8. A SZÉNHIIDROGÉN TERMELÉS HATÁSFOKA

A szénhidrogén-termelés egyik külső szemlélő számára nehezen érthető, de a tárolómérnökök számára jól ismert vonása, hogy a kitermelési hatások a földtani vagyponra vonatkoztatva meglepően kicsi, átlagosan 30–35%. Ez azt jelenti, hogy minden kitermelt 1 t olaj bizonyítottan 2 t tárolóban visszamaradó olajjal egyenértékű. Az átlagos hatások mögött természetesen szélsőséges egyedi értékek vannak, ezek a tároló szerkezeti felépítésével és a tárolt fluidum tulajdonságaival viszonylag jól értelmezhetők és korrelálhatók.

A kitermelési hatások a térfogati (horizontális és vertikális) elárasztási hatások és a mikroszkopikus kiszorítási hatások szorzataként definiálható. Ami az egyes hatáshatényezőket illeti, laboratóriumi vizsgálatok és üzemi tapasztalatok egyaránt arra utalnak, hogy azok közel egyenlő arányban felelősek a kihozatali hatások alakításáért. Ezek szerint, a fáziscsere folyamán az áramlás a teljes tárolótérfogat közel 60%-át érinti és az áramlással érintett tárolótérben lévő kőolajnak is csak kb. 60%-át sikerül mobilizálni a kiszorítófázissal, azaz a vízzel. Ezek az értékek tehát a másodlagos eljárások (vízelárasztás) befejező szakaszára érvényes adatok, amikor is a tárolóban érdemleges beavatkozás sem a fluidumok mozgékonyágába, sem a többfázisú rendszer felületi tulajdonságaiba nem történik. Amennyiben a fenti közelítést többé-kevésbé helyesnek fogadjuk el, úgy az 1850-től napjainkig felszínre hozott 140 Gt kőolajat alapul véve 140-140 Gt-ra becsülhetjük a térfogati elárasztási, illetve a mikroszkopikus kiszorítási hatások potenciálját a világon. Ez összességében 280 Gt földtani készletet tesz ki, aminek egy része az IOR/EOR módszerekkel a jövőben feltétlenül kitermelhető, ha a két hatások elemet egyaránt 60%-ra növeljük.

A kitermelési hatások növelése már mintegy száz éve az érdeklődés homlokterében áll. Az első szabadalmakat a mikroszkopikus kiszorítási hatások növelésére a XX. század húszas éveiben adták meg az USA-ban. Elméleti és gyakorlati vonatkozásban azonban a kutatások csak mintegy ötven évvel ezelőtt gyorsultak fel. Az intenzív K+F tevékenység eredményeként mára egyértelműen kijelölhető a kihozatali

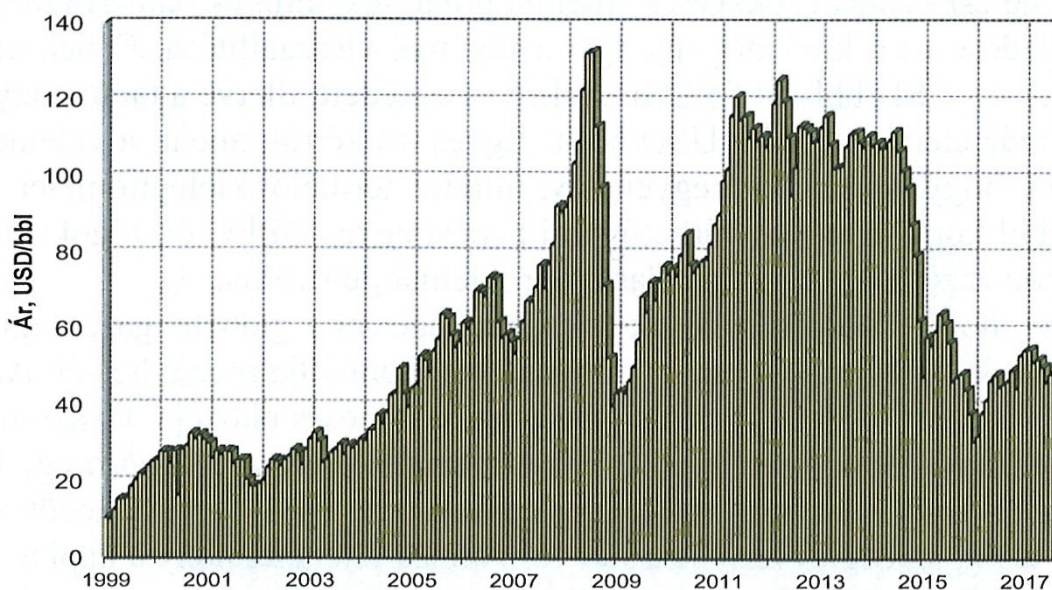
hatásfok növelésének elméleti lehetősége mind a két hatásfok vonatkozásában. Így például megállapítható, hogy a térfogati elárasztási hatásfokot a tárolók szerkezeti felépítése és a viszkózus erők nagysága (a viszkózus folyás aktiválási energiája) határozza meg, míg a felületi erők szerepe a hatásfok alakításában elhanyagolható. Ezzel szemben nyilvánvaló, hogy a mikroszkopikus kiszorítási hatásfok növelése csak a határfelületi energiák (határfelületi deformáció aktiválási energiájának) radikális megváltoztatása eredményeként lehetséges. A szénhidrogén-termelés kihozatali hatásfokának alacsony volta tehát elméleti megközelítésben annak tulajdonítható, hogy a réteg természetes, vagy részben pótolta energiája nem elegendő a tároló teljes pórusterére vonatkozó termodinamikai potenciálgát (aktiválási energia) leküzdésére. Az új és hatékony termelési eljárások fejlesztésének dilemmája éppen arra vezethető vissza, hogy a rezervoármechanikai és termodinamikai feltételrendszerre a termodinamikai divergencia a jellemző. Ugyanis amíg a térfogati elárasztási hatásfok javítása (mozgékonyosság és profilszabályozás) a termodinamikai potenciálgát növelésével jár, addig a mikroszkopikus kiszorítási hatásfoknövelés a termodinamikai potenciálgát csökkentése útján valósítható meg. Ebből viszont következik, hogy ez utóbbi esetben csak a kémiai alapokon nyugvó termelési eljárások alkalmazása vezethet a kívánt eredményre. Nem mellőzhető a földgáztermelés kihozatali hatásfokának javítása sem annak ellenére, hogy az intenzív gáztermelés hatásfoka, eltérően a kőolajtermeléstől, általában 70–80% feletti. Így a fejlesztések kihozatalnővelő potenciája, a nem konvencionális földgáztárolók kivételével, viszonylag csekély.

Összességében tehát határozottan le kell szögezni, hogy a jövőben az inter- és multidiszciplináris kutatásfejlesztésnek, a tárolómérnöki és vegyészmérnöki ismeretek együttes alkalmazásának az eddigieknél nagyobb és meghatározó szerepet kell kapnia az intenzív (EOR, Enhanced Oil Recovery; EGR, Enhanced Gas Recovery) szénhidrogén-termelésben.

9. A SZÉNHYDROGÉNEK ÁRÁNAK ALAKULÁSA HOSSZÚ ÉS RÖVID TÁVON

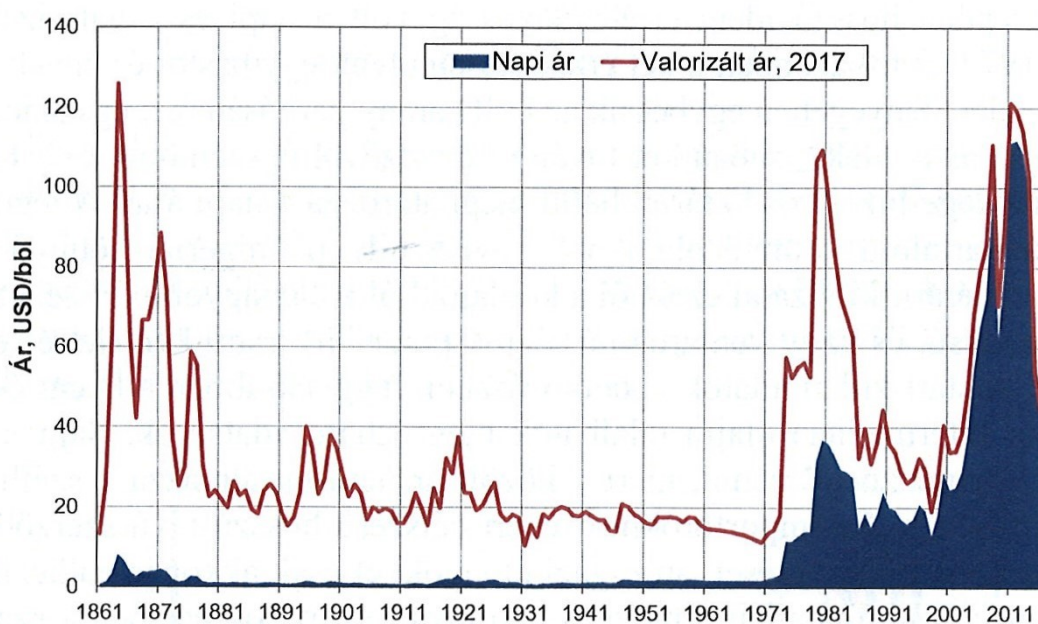
A szénhidrogén-termeléssel foglalkozó vállalatok (multinacionális cégek) közismerten és hírhedten a kizárólagosan profitorientált iparágat testesítik meg. Másfél száz éves történetükben az érzelmi motiváció, a humanitás és a jövő generációja iránt felelősség érzete alig fedezhető fel. Nem meglepő tehát, hogy az E+P (Exploration + Production) tevékenységhez kapcsolódó K+F+I szoros kapcsolatban van a mindent meghatározó világpiaci olajárral, ezen belül főleg a termelési költséggel és a szükséges tőkebefektetéssel. Önmagában a termelési költség is igen széles határ között változik. A Közel-Kelet több országában a termelési költség legfeljebb néhány USD/bbl, míg az offshore és sarkvidéki területeken elérheti a 40–50 USD/bbl-t. Másfelől, a tényleges napi ár hektikusan változik időben 40 és 140 USD között és sokszor nehéz kimutatni ennek közvetlen okát. Közismert például, hogy az ár függvénye a dollár vásárlóerő-paritásának (korábban aranyparitásának). Ebben a vonatkozásban határkő volt, amikor 1973-ban formálisan összeomlott a második világháború után létrehozott ún. Bretton Woods-i egyezmény, ami szoros

összefüggést állapított meg a dollár és az arany között. Ez utóbbi miatt szükségesnek kell tekinteni és figyelemmel kísérni a napi és a valorizációs számítások szerinti ár alakulását a kezdetektől fogva, ami a 26. és 27. ábrán látható.



26. ábra

A kőolaj napi árának alakulása 1999 és 2018 között



27. ábra

A kőolaj valorizált és napi árának alakulása 1861 és 2018 között

Amint az a 26. ábrán látható, a közelmúltban a napi ár 2005-ig lassan emelkedett, de 40 USD/bbl alatt maradt. Ezt követően azonban meredek növekedés következett be és egy rövid ideig meghaladta a 120 USD/bbl-t is. A 2008-ban bekövetkezett globális gazdasági válság hatására és a szénhidrogének iránti kereslet drasztikus csökkenése miatt az ár ismét 45 USD/bbl-re zuhant. A válságból való viszonylag gyors kilábalás az árat ismét 100 USD/bbl fölé emelte. Az ezt követő 3-4 évben az iparág ismét aranykorát élte és ezzel párhuzamosan a stratégiai tartalékok is feltöltődtek. Ez ún. túltermelési válsághoz hasonló állapotot eredményezett, nem utolsó-

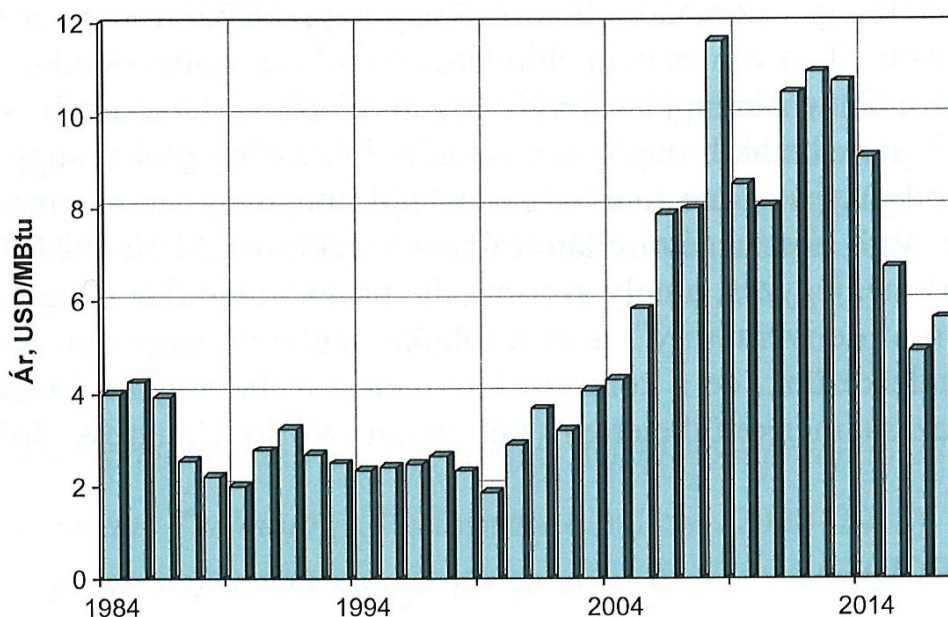
sorban azért, mert a világ legnagyobb importőre, az USA lényegében önellátó lett szénhidrogénekből, elsősorban földgázból (palagáz, CBM, gázhidrát, kondenzátum kitermelésének megindításával). Az OPEC bécsi tanácskozásán, ellenintézkedés-ként a kitermelési kvóták csökkentése mellett döntöttek, aminek hatására megindult az ár emelkedése és a kínálat/igény egyensúlyának visszaállítása. Ennek eredményeként az ár 45 USD/bbl-ről 55 USD/bbl-re emelkedett, illetve a tanulmány írásának idején már elérte a 75–80 USD/bbl-t. Egyes szakértők annak a véleménynek adtak hangot, hogy hosszú távú egyensúly, minden termelőt kielégítő piaci ár csak ~100 USD/bbl környezetében várható, ami persze egyes OPEC-országokban óriási extraprofit hozhatna és újabb gazdasági problémát generálna.

Az a tény, hogy a szénhidrogén ára kizárólagosan a globális gazdasági válságtól függ és kizárólagosan negatív irányban hat, nem állja meg a helyét. Az indokolatlanul magas ár is lehet ugyanis a gazdasági visszaesés okozója. Gyakran politikai és katonai motiváció is tetten érhető az ármozgásokban. A 27. ábra egyik érdekessége, hogy a valorizált olaj ár az iparág hőskorában, 1861 és 1881 között szintén magas, egy ideig, az eddigi legmagasabb volt, annak ellenére, hogy a napi ár legfeljebb néhány USD/bbl volt. Ennek hátterében a kőolaj sokoldalú használhatóságának felismerése, használatának kiugró igénye volt, ami rendkívüli keresletet eredményezett. A két görbe lefutása és különbsége mindenesetre arra utal, hogy 1891 és 1971 között, meglepően hosszú ideig értékarányosság volt a napi és a valorizált olajár között. Az 1972. évtől azonban a két érték élesen elvált egymástól és ennek a folyamatnak a kezdete lényegében egybeesik az USD arany paritásának megszűnésével.

A kőolaj árának alakításában két további tényezővel is számolni kell. Egyfelől, a kőolaj minősége bizonyos határon belül meghatározza a napi árat. A legnagyobb ára a kis kéntartalmú könnyű olajoknak (sweet oil), pl. nigériai könnyű olajnak van, mert a fehéráru-kihozatal ezekből a kőolajokból a legnagyobb. Ezzel szemben, nagy viszkozitású, és nagy kéntartalmú olajok (sour oil) iránti kereslet és ezek ára szerényebb. A statisztikai adatok vonatkozásában leggyakrabban a Brent és a WTI (West Texas Intermediar) olajra találhatók megbízható adatsorok. Sajnos, ezeket sem lehet „készpénznek” venni, mert a közölt ár nem tartalmazza a szállítás és a biztosítás költségét. Az importőröknek, ezért célszerű hosszú távú szerződésekkel biztosítani a kőolaj beszerzését, ami igazi előnyökkel csak akkor jelentkezik, ha az ár stabilis. A kiszámíthatatlan ármozgás hátrányait ezért sok esetben a szabadpiacon úgy küszöbölik ki, hogy ún. „spot” áron vásárolják az importőrök az olajat, de ennek a kereskedelmi elvnek is lehetnek hátrányai.

Első közelítésben a földgáz árára nem állnak rendelkezésre ilyen egyértelmű, tömeg- vagy térfogategységre vonatkozó adatok. Ennek oka az, hogy az iparilag kitermelt és felhasznált természetes gázok összetétele igen széles határ között változik. Amíg az ún. nagy inert (CO_2 , N_2) tartalmú gázok szénhidrogén komponenseinek mennyisége akár 30%-nál is kisebb lehet, addig nem ritka a 90% feletti metántartalommal rendelkező gáz sem. Értelemszerűen, a gáz energiahordozóként vagy elsődleges vegyipari alapanyagként való hasznosítása elsősorban a szénhidrogéntartalomhoz kötődik, következésképpen a gáz árát nem lehet egységesen kezelni. Mivel a hasznos tulajdonság a gáz entalpiatartalmához kötődik, a földgáz árát a

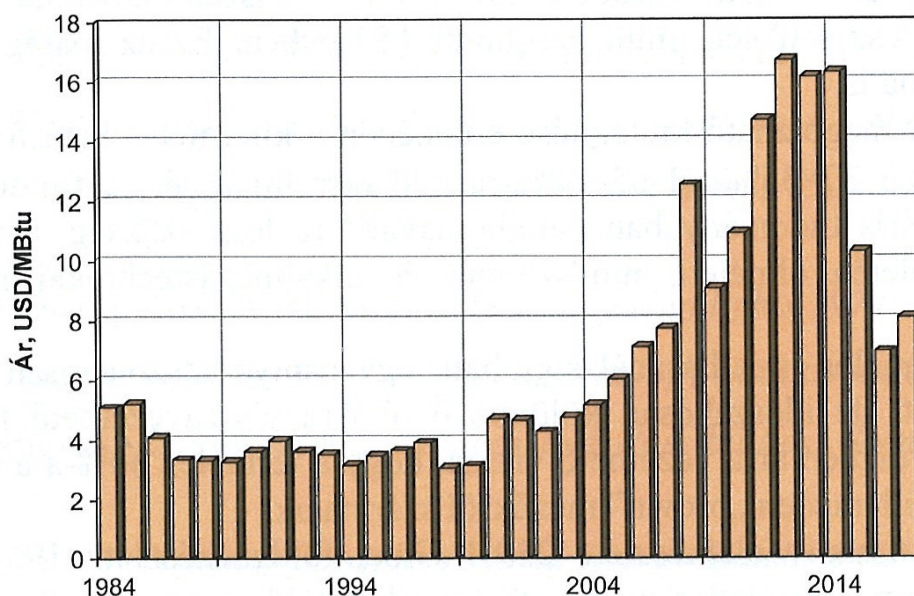
kezdetektől fogva a hőegyenértékhez kapcsolták, amit BTU (British Thermal Unit) egységben adnak meg. A leggyakrabban idézett adatsort az 1986–1990 évekre a German Federal Statistical Office, az 1991–2017 időszakra a German Federal Office of Economics and Export Control tette közzé, ami a 28. ábrán látható.



28. ábra

A földgáz árának alakulása 1984 és 2017 között

Tekintettel arra, hogy a földgáz jelentős része csővezetéken nem, csak cseppfolyósított formában (NLG, Natural Liquid Gas), újabban közepes forráspontú konverziós folyadékként (GTL, Gas-To-Liquid) szállítható. Autentikus források az ár alakulását ebben az esetben is millió Btu egységben adják meg. Az EDMC Energy Trend cég jellegzetes adatsorokat szolgáltat az egységnyi hőegyenértékre NLG-re (ár + biztosítás + szállítás, CIF feltételei mellett) is (29. ábra).



29. ábra

A cseppfolyós földgáz árának alakulása 1984 és 2017 között

Nem meglepő, hogy a 28. és 29. ábrán látható adatsorok között szoros korreláció van. Ha azonban a két ábrán látható trendet összehasonlítjuk 23. ábrán látható napi olaj ár alakulásával, akkor nem lehet vitás, hogy az utóbbi meghatározó hatást gyakorol a földgáz árára is. A különbség legfeljebb abban jelentkezik, hogy a gáz ára kevésbé érzékenyen és mértékben reagál a globális gazdasági válságra. Mindhárom szénhidrogén-féleségre azonban jellemző, hogy napjainkban a napi ár még a lassú növekedés szakaszában van és nem előrelátható, hol fog stabilizálódni. Nem zárható azonban ki a Time címlapjára került Bryan Walsh jóslata, amely szerint „The truth about oil: new breakthroughs are actually increasing global supplies, but the era of cheap oil may be gone forever”. Másfelől, megnyugtató az emberiség szénhidrogénnel való hosszú távú ellátottságára vonatkozó Al-Naimi (olajminiszter, Szaúd-Arábia) megjegyzés, amely szerint „the problem we face is not availability, it is a problem of deliverability”, azaz a földön megfelelő nagyságú szénhidrogén-vagyonnal rendelkezünk, de a korszerű kitermelési technológia fejlesztése és általános alkalmazása megkerülhetetlen (Petroleum World Congress, Johannesburg, Dél-Afrika).

10. ÖSSZEFOGLALÁS

A föld lakosságának és az életminőség indexének növekedése az energiaigény radikális növekedését hozza magával és 2050-re elérheti a 1600 EJ értéket.

A GDP jelenlegi kb. 100×10^{12} USD értéke gyorsuló trendet jelez és 2035-ben elérheti a 200×10^{12} USD értéket. A GDP növekedés dinamikáját 10–20%-ban a népesedés számszerű növekedésére, illetve 80–90%-ot az egy személy hozzájárulására/fogyasztására lehet visszavezetni.

Belátható időn belül a TPES 18 Gtoe-ra növekedhet. A TPES meghatározó eleme a szénhidrogének 50%-os, a fosszilis energiahordozók 70–80% részaránya, ami rövid távon érdemben nem fog változni.

A fosszilis energiahordozók relatív szerepe hosszú távon, jelentős mértékben csökkenni fog, de a XXI. században közel két és félszer több kőolaj és földgáz kitermelésére lesz szükség, mint az elmúlt 150 évben. Ez az iparág legnagyobb kihívása már ma is.

Az igények megbízható kielégítése érdekében a kitermelés határfokát a napjainkban jellemző 30–35%-ról 65–68%-ra kell növelni. Ezért a fluidumbányászat interdiszciplináris tudományában paradigmaváltásra lesz szükség, ami a kutatás-fejlesztés területén elméleti, módszertani és alkalmazástechnikai megújulással egyenértékű.

A kőolajtermelés és felhasználás globális egyensúlya látszólagosan megnyugtató képet mutat, de időszakosan különböző okokra visszavezethető fluktuáció is jellemzi, ami részben arra vezethető vissza, hogy a termelés 60%-a a nem OPEC-országokból, jellemzően „brown” mezőkről származik.

A világ kumulatív olajkészlete 239,3 Gtoe, földgázkészlete 193,5 Tm³ volt 2017-ben. A termelési élettartam mindkét esetben több mint 50 évet valószínűsít a jelenlegi termelési szinten. A reménybeli új feltárások ezt 25–40 évvel növelhetik.

A szénhidrogén-felhasználás intenzitása nagymértékben különbözik a fejlett és a fejlődő országok között. Egységnyi GDP megtermelése egyes országokban ma is háromszor több energiárfordítással történik.

A CO₂-emisszió 2014-től \approx 32 Gt-ás értéken stabilizálódott. Ennek 60%-a a szénhidrogének, 40%-a a szénfészeség használatára vezethető vissza. Jelenleg az energiatermelés okozta kibocsátás azonban csak 10 Gt, azaz kevesebb, mint 30%-a az összes emissziót tekintve.

Az olcsó szénhidrogének időszaka, részben energiahordozóként és fokozódóan petrokémiai alapanyagként való alkalmazása miatt, valószínűleg befejeződött. Optimizmusra ad azonban okot, hogy a földön megfelelő nagyságú szénhidrogén-vagyonnal rendelkezünk, de a korszerű kitermelési technológia fejlesztése, az ipari készlet növelése megkerülhetetlen.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- United Nations, Economic and Social Affairs, *World Population to 2300* (2007).
- Journal of Petroleum Technology*, Performance Indices (2000–2018).
- BP Statistical Review of World Energy* (2010–2018).
- BP Statistical Review of World Energy*, Workbook Excel file (2010–2018).
- International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook* (2010–2017).
- ExxonMobil, *The Outlook for Energy: A View to 2030* (2006).
- International Energy Agency (IEA), Special Report, *Energy and Climate Change* (2015).
- International Energy Agency (IEA), *Energy Supply Security of Countries* (2014).
- International Energy Agency (IEA), *Production Costs of Transportation Fuels and Influence of Crude Oil Price and Technology Maturity* (2013).
- International Energy Agency (IEA), *Resources to Reserves* (2013).
- International Energy Agency (IEA), *CO₂ Emissions from Fuel Combustion* (2013).
- International Energy Agency (IEA), *20 Years of Carbon Capture and Storage* (2016).
- International Energy Agency (IEA), *Energy Policy Highlights 1974–2014* (2013).
- International Energy Agency (IEA), *Energy Technology Initiatives 2013* (2013).
- Shell International, *Energy Needs, Choices and Possibilities, Scenarios to 2050* (2001).
- International Energy Agency (IEA), *Key World Energy Statistics* (2008).