

**Dr. Büki Gergely**

**3.**  
**FOSSZILIS ERŐMŰVEK**

**BUDAPEST**  
**2005. január**

*Dr. Büki Gergely*

**3.**

***FOSSZILIS ERŐMŰVEK***

*Budapest*  
*2005. január*

Ez a kiadvány a Magyar Atomfórum Egyesület által közreadott sorozat része, amely a hazai villamosenergia-ellátás jövőjének kérdéseit vizsgálja. Külön kötetek foglalkoznak a szóba jöhető változatok bemutatásával, a különböző energiaforrások előnyeinek, hátrányainak és kockázatainak ismertetésével. Amennyire lehetséges volt az egyes részek kitérnie a technológiához kapcsolódó társadalmi, közgazdasági, jogi környezet kérdéseire is. A sorozat keretében az alábbi témakörök feldolgozására került sor:

1. Hazai energiaigények
2. Hazai villamosenergia-források
3. Fosszilis erőművek
4. Atomerőművek
5. Megújuló energiaforrások
6. Villamosenergia-termelési technológiák összehasonlítása
7. Rendszerek, hálózatok, fejlesztési stratégiák

A sorozat kidolgozásához az Egyesület munkacsoportot alakított, amelyben az egyes szakterületeket jól ismerő tagok vettek részt. A munkacsoportot Dr. Büki Gergely, Bohoczky Ferenc, Dr. Csom Gyula, Dr. Fazekas András István, Homola Viktor, Dr. Stróbl Alajos és Zarándy Pál alkották. A szerkesztési és szervezési munkát Dr. Czibolya László végezte.

A munkacsoport nem tartotta feladatának, hogy energiapolitikai javaslatokat dolgozzon ki, vagy ilyen ajánlásokat tegyen. A kiadványsorozat megjelenetésével hozzá akarunk járulni ahhoz, hogy a villamosenergia-ellátásról érdemi és tárgyyszerű párbeszéd alakuljon ki, amelyben a tények és érvek összevetése dominál. Ennek eredményeként – remélhetőleg – kikristályosodik egy olyan szakmai és társadalmi érv- és értékrendszer, amelyre támaszkodva egy tudatos energiapolitika kialakítható.

A jövőben ugyan – a fosszilis energiahordozók véges készlete és kedvezőtlen környezeti hatásai miatt – a fosszilis erőművek visszaszorítására törekszünk, mégis a tervezhető időn belül (pl. 2020-ig) az erőműrendszer fejlesztésének meghatározó részét még ezek a szénhidrogén- és széntüzelésű erőművek fogják képezni. Várható szerepük meghatározó lesz a közvetlen villamosenergia-termelésben, a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés pedig szinte teljesen a szénhidrogén erőművekben valósul meg. A fosszilis erőművek korábban nagy egységekben épültek. A koncentrált (hagyományos) erőművek mellett – fosszilis primerenergiák esetén is – az utóbbi időben fokozatosan megjelentek a decentralizált (alternatív) energiatermelő eljárások.

A jelen fűzet célja kettős: (a) egyrészt bemutatja a koncentrált és a decentralizált fosszilis erőművek fejlesztésének újabban érvényesülő főirányait, kialakult és várható energetikai-gazdasági-környezeti jellemzőit [1], (b) másrészt a középtávú energiakonceptió vizsgálataihoz kapcsolódva [2] vázolja a fosszilis erőművek lehetséges szerepét a hazai közvetlen villamosenergia-termelésben és kapcsolt energiatermelésben.

## **3.1. A fosszilis erőművek várható szerepe Magyarországon**

A fosszilis erőművek 2020-ig várható villamosenergia-termelését a villamosenergia-igények és más források (atomerőmű, megújuló energiák hasznosítása, villamosenergia-import) könnyebben becsülhető termelése különbségeként határozzuk meg. Kiindulást jelent a 2002. évi 40 TWh és a 2020. évre becsült 54 TWh villamosenergia-igény. Feltételezzük a Paksi Atomerőmű üzemidő-hosszabbítását, és a lényegében változatlan 14 TWh évi villamosenergia-termelését (az esetleges teljesítménynövelés befolyásától eltekintünk), és új atomerőmű létesítésével a vizsgált időszakban nem számolunk. A következő feltételezések kisebb energiamennyiségekre vonatkoznak, de viszonylag nagy bizonytalanságot tartalmaznak: a megújuló energiákból termelt villamosenergia feltételezett értéke 2002-ben kerekén 1 TWh (2,5%), 2020-ban 3 TWh (5,6%); a számos tényezőtől függő villamosenergia-import/export szaldóját – egyszerűsítés érdekében – 6 TWh értékkel változatlanak tekintjük.

Ezek figyelembevételével a fosszilis tüzelőanyagot felhasználó erőművek villamosenergia-termelése 2002 és 2020 között mintegy 19 TWh-ról hozzávetőleg 31 TWh-ra, mintegy 63%-kal nő (3.1. táblázat), és természetesen számottevő sávval is (pl.  $31 \pm 3$  TWh) indokolt számolnunk. A táblázat csak a 2020. évi adatokat becsüli, a 2002–2020 közötti felfutás dinamikájával nem foglalkozik. Az egyszerűsítő feltételezések és a lehetséges sáv (a növekedés  $\pm 10\%$ -a) a fosszilis erőművek növekedését lényegesen nem befolyásolja.

A táblázat feltünteti az erőműrendszer becsült csúcsteljesítményét és beépített teljesítőképességét, s az ezekből számítható tartaléktényezőt. Továbbá megadja az erőműrendszer évi csúskihasználási időtartamát.

Az adatokból – a becslések mellett is – elég határozottan kitűnik, hogy a visszaszorítási szándék ellenére a fosszilis erőművek várható villamosenergia-termelése nem csökken, hanem mind abszolút, mind relatív értékben még számottevően nő a vizsgált időszakban.

3.1. táblázat. A fosszilis erőművek évi villamosenergia-termelése, teljesítményei és kihasználási időtartama 2002-ben és várhatóan 2020-ban

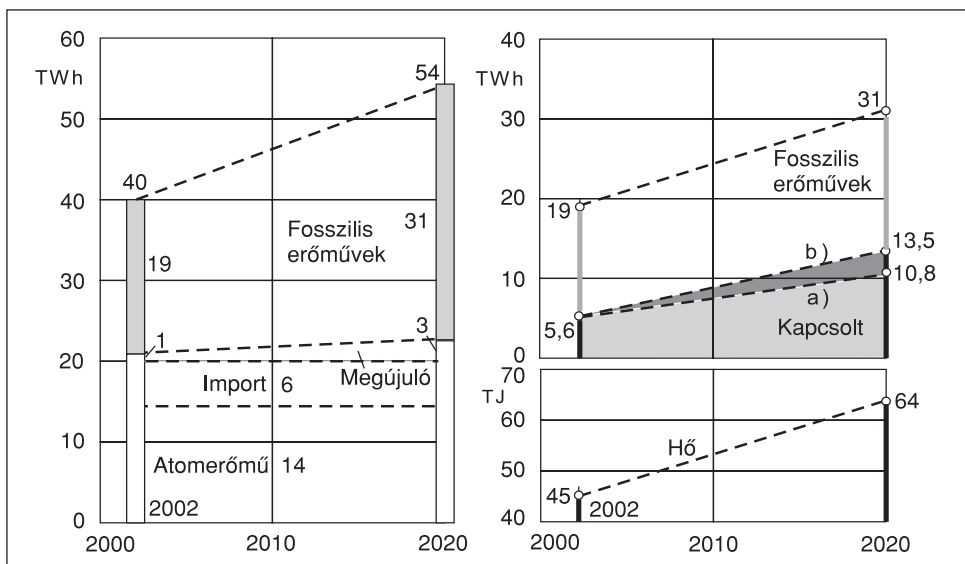
		2002	2020
Összes villamosenergia-igény – növekedése	TWh	40	54
	%	100	135
Atomerőmű villamosenergia-termelése Villamos energia megújuló energiákból Villamos import-export szaldó	TWh	14	14
	TWh	1	3
	TWh	6	6
Fosszilis erőművek villamosenergia-termelése – növekedése	TWh	19	31
	%	100	163
	%	47,5	57,4
Csúcsteljesítmény Beépített teljesítőképesség Tartaléktényező	MW	6000	8000
	MW	8250	9600
		1,38	1,2
Évi csúcskihasználási időtartam	h/év	6667	6750

Ugyanebben az időszakban változik az erőművek hőkiadása és kapcsolt energiatermelése, amit a 3.2. táblázat mutat. 2002-ben az erőművek összes hőkiadása 45 PJ, kapcsolt villamosenergia-termelése 5,6 TWh (az összes villamos energia 14%-a). 2020-ban az erőművi hőkiadás becslült értéke 64 PJ, a kapcsolt villamosenergia-termelés feltételezett alternatív értékei: a) változatban 10,8 TWh (20%), b) változatban 13,5 TWh (25%). A Paksi Atomerőmű hőkiadása 0,6 PJ, kapcsolt villamosenergia-termelése 0,08 TWh, az előző értékekhez képest nagyon kicsi, tehát úgy tekinthetjük, hogy a fenti hőkiadás és kapcsolt villamosenergia-termelés a fosszilis erőművek feladatát képezi, s ezek villamosenergia-termelésében természetesen lényegesen nagyobb a kapcsolt villamosenergia-termelés aránya.

3.2. táblázat. A fosszilis hőerőművek hőkiadása és kapcsolt villamosenergia-termelése 2002-ben és várhatóan 2020-ban

		2002	2020
Hőkiadás	PJ	45	64
	%	100	142
Kapcsolt villamosenergia-termelés a) változat	TWh	5,6	10,8
	összes %-a	14	20
	fosszilis %-a	29,5	34,8
Kapcsolt villamosenergia-termelés b) változat	TWh	5,6	13,5
	összes %-a	14	25
	fosszilis %-a	29,5	43,5

A fosszilis erőművek 2002–2020 között várható villamosenergia-termelését, hőkiadását és kapcsolt energiatermelését a 3.1. és 3.2. táblázat adatai alapján a 3.1. ábra szemlélteti. Becslésünk itt is csak a 2020-ban várható viszonyokra vonatkozik, a felfutás dinamikájára nem tér ki.



3.1. ábra. Fosszilis erőművek várható évi villamosenergia-termelése, hőkiadása és kapcsolt energiatermelése 2002. és 2020. években

## 3.2. Szénerőművek

Szénerőművek esetén át kell tekintenünk a meglévő szénerőműveink jövőbeni sorsát és a jövőben létesíthető új szénerőművek megoldásait. Meg kell vizsgálni a hazai alkalmazásra szóba jövő szénerőművek lehetőségeit a villamosenergia-ellátásban és környezetbe illesztésük kérdéseit.

### 3.2.1. A meglévő szénerőművek sorsa

A meglévő szénerőművek jövőjét gazdasági jellemzőik és környezeti hatásaik határozzák meg. Mindkettőben meghatározó szerepe van a hatásfoknak: az alacsony (30% alatti) hatásfokú szénerőműveink a nagy tüzelőkölségük miatt gazdaságilag versenyképtelenek, a fajlagosan nagy széndioxid kibocsátásuk és egyéb környezetterhelésük miatt pedig a környezet számára elfogadhatatlanok.

A jelenlegi szénerőművek 2020-ban már nem üzemelnek. A barnaszén-tüzelésű erőművek zöme (Ajka, Bánhida, Borsod, Pécs, Tiszapalkonya) már a közeljövőben leáll, kis részük fatüzelésre áll át. A füstgáz-kéntelenítővel kiegészülő, de kis hatásfokú Oroszlányi Erőmű üzemeltetésének célszerűsége jelenleg is kérdőjeles, de üzeme 2020 előtt bizonyosan befejeződik. A rossz hatásfokú lignittüzelésű 100 és 212 MW villamos teljesítményű egységek sem felelnek meg már 2020-ban a környezetvédelmi követelményeknek. Végeredményben tehát 2020-ig az összes meglévő szénerőmű-egység leáll.

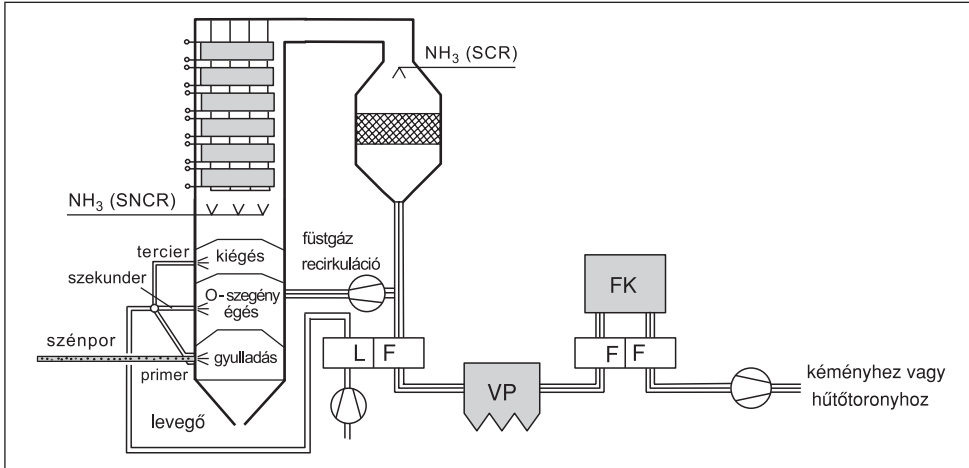
A meglévő szénerőművek telephelye és infrastruktúrája viszont további erőműépítés számára is rendelkezésre áll. Ennek nemcsak költségkímélő hatása van, hanem meghatározó az is, hogy a közvélemény könnyebben fogad el meglévő telephelyen további erőműüzemet, mint új telephelyen erőmű-létesítést.

### 3.2.2. Új szénerőmű megoldások

A szénerőműveket két főirányban fejlesztik [3]. Az egyik irányt a hagyományos széntüzelésű gőzerőművek jelentik, a gőzparaméterek igen jelentős növelésével (szuperkritikus gőzerőművek). A másik lehetőséget a szénbázisú kombinált gáz/gőzerőművek nyújtják, különböző megoldásokkal. Mindkét főirányt köszénre és barnaszénre egyaránt vizsgálják.

a) Új gőzerőműveket szénhidrogén tüzeléssel gyakorlatilag már nem építenek. Ugyanakkor a *széntüzelésű szuperkritikus gőzerőművek* fejlesztésére igen jelentős erőfeszítéseket, nemzetközi összefogásokat tapasztalunk, tekintettel arra, hogy a világon rendelkezésre álló nagy szénvagyon környezetbarát hasznosítására a jövőben sor kerülhet [4–9].

A kifejlesztett szénportüzelésű szuperkritikus gőzkazán és a hozzá tartozó környezetvédelmi berendezések viszonylag egységes felépítésűek, amit a 3.2. ábra szemléltet. A nyilvánvalóan kényszeráramlású kazán fűtőfelületeit általában toronykazánban helyezik el. Az előírt, alacsony nitrogén-oxid kibocsátást a tüzelés megfelelő kialakításával, a levegő megosztásával, esetleg füstgáz-recirkulációval, a tüztérben alkalmazott nem szelektív (SNCR) és kazán utáni szelektív (SCR)  $\text{NO}_x$ -leválasztókkal érik el. A porleválasztást villamos porleválasztó (VP) oldja meg. Korszerű kazánokhoz mindig beépül valamilyen típusú, többnyire nedves-meszes füstgáz-kéntelenítő berendezés (FK). A tisztított és alacsony hőmérsékletű füstgázokat kéményen, vagy ha van, akkor a nagyobb felhajtóerővel rendelkező hűtőtornyon keresztül vezetik ki [10–12].

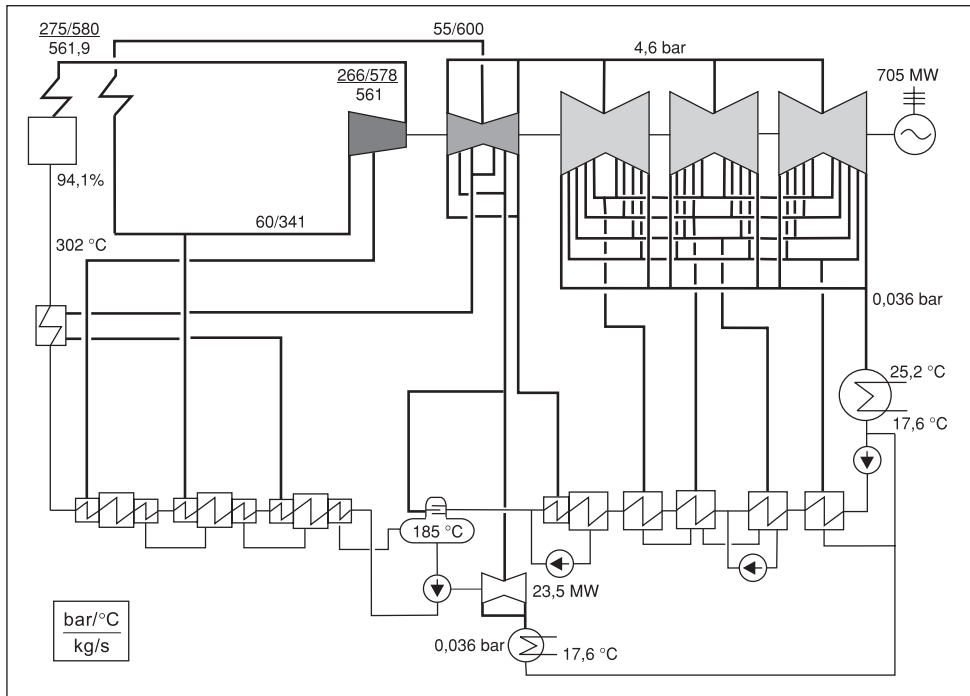


3.2. ábra. Szénportüzelésű szuperkritikus gőzkazán rendszere a megkívánt környezetvédelmi berendezésekkel

A bemutatott szuperkritikus kazánrendszer köszén és barnaszén eltüzelésére egyaránt alkalmas. Barnaszéntüzelés esetén két különbség indokolt lehet. Egyrészt a nagyobb tömegáramú füstgázokat az égési levegővel nem tudjuk kellően lehűteni, ezért a füstgázokat részben más célra, pl. tápvíz-előmelegítésre fordítják. Másrészt a nagy ned-

vességtartalmú barnaszenekeknél vizsgálják a szén termikus és/vagy mechanikus víztelenítését (nem az örlés érdekében végzett, elgőzölögtetéssel járó szárítását) annak érdekében, hogy a szén (alsó) fűtőértéke helyett (felső) égéshőjét hasznosíthassuk. Az utóbbi esetben a barnaszén-tüzelésű kazán hatásfoka jól megközelíti a kőszén-tüzelésűét [13–15].

Egy korszerű széntüzelésű szuperkritikus gőzerőmű hőkapcsolását a 3.3. ábra mutatja be [16]. A bemutatott példa a következő általános vonásokat tükrözi:



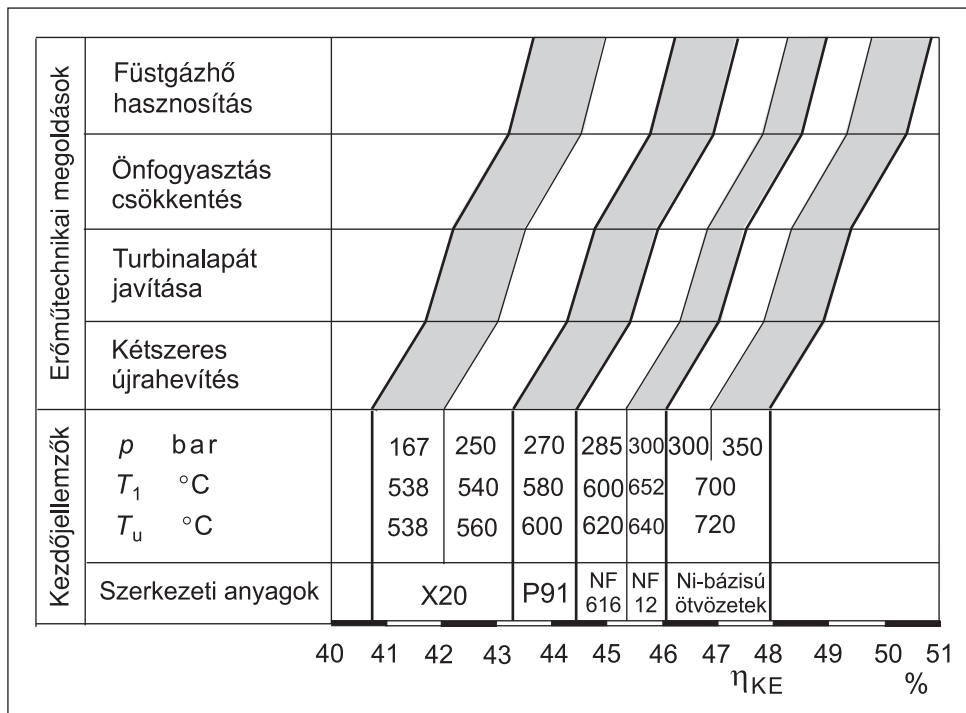
3.3. ábra. Egy széntüzelésű szuperkritikus gőzerőmű tipikus hőkörfolyamata

- A szuperkritikus gőz nyomása 250–350 bar között változik, kezdőhőmérséklete a 600 °C-ot közelíti. Az újrahevítés egy- vagy kétszeres (a példában egyszeres), hőmérséklete a frissgőzét általában 10–20 °C-kal meghaladja;
- A tápvíz-előmelegítés 9–10 fokozatú, a tápvíz véghőmérséklete mintegy 300 °C. Az alkalmazott gőzhűtők főáramkörűek, ezeket előmelegítőnként esetlegesen alkalmazzák, az előmelegítés utolsó fokozata mindig főáramkörű gőzhűtő;
- A gőzturbina háromházas (kétszeres újrahevítés esetén négyházas lenne), példában a középnyomású rész ikeráramú, a kisnyomású rész három ikeráramú, a minél kisebb kondenzátornyomás elérése érdekében. Természetesen a közép- és kisnyomású házak száma teljesítményfüggő. A korszerű széntüzelésű szuperkritikus blokkok villamos teljesítmőképessége 400 és 1000 MW között változik.

A széntüzelésű gőzerőmű-egységek fejlesztésének középpontjában a hatásfokjavítás áll. Ennek lehetőségeiről a 3.4. ábra nyújt tájékoztatást. A fejlesztésnek két útja van: a jobb hőálló acélok használata és különböző erőműtechnikai fejlesztések.



A jobb hőálló acélok alkalmazása lehetővé teszi a gőzparaméterek lényeges növelését [17–21]. Ferrites acélok esetén szubkritikus nyomás mellett max. 540 °C körüli hőmérséklet érhető el. A 9–11% krómtartalmú martenzites, az ausztenites Cr-Ni acélok és a Ni-bázisú szuperötvözetek esetén növekvő szuperkritikus nyomás esetén a hőmérséklet legalább 580 °C-ra, de akár 700 °C fölé is növelhető. A jobb szerkezeti anyag alkalmazása mintegy 6–8%-os hatásfokjavítást eredményez.



3.4. ábra. Szénerőmű-egységek hatásfoka az alkalmazott hőálló acélok és az erőműtechnikai fejlesztések függvényében

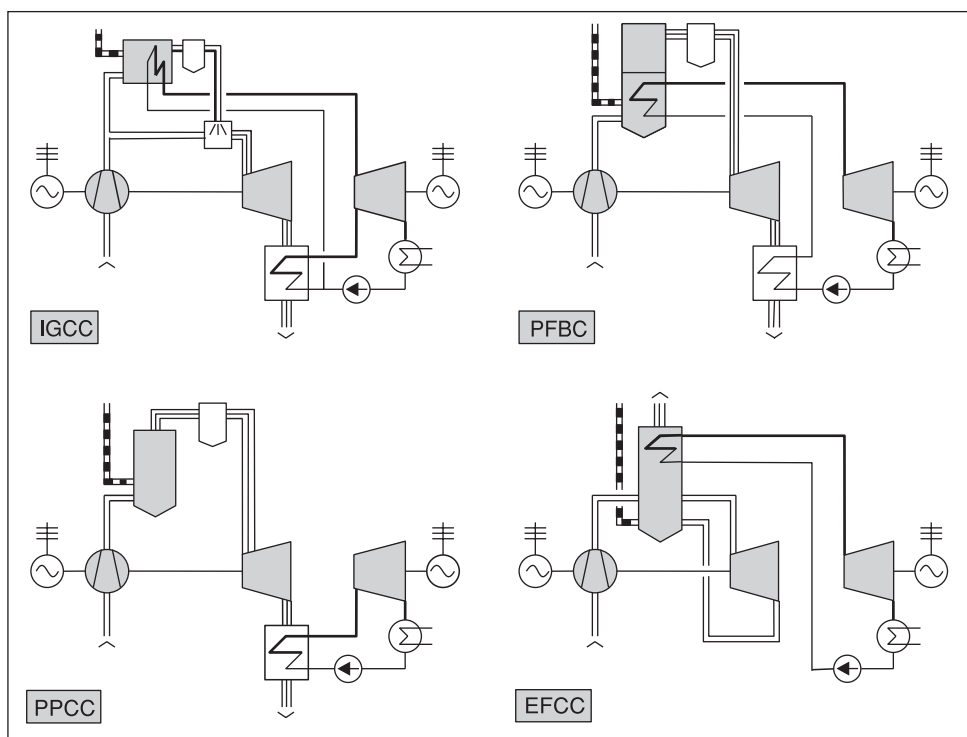
Az erőműtechnikai eljárások, köztük a kétszeres újrahevítés, a gőzturbina hatásfokjavítása, az önfogyasztás csökkentése, jobb füstgázhő-hasznosítás stb., az eddigi szinthez képest további mintegy 3% hatásfoknövelést eredményeznek.

A gázturbináknál általánosan használt Ni bázisú szuperötvözetek alkalmazása gőzerőműveknél – a nagy mennyiségek miatt – még távlatinak tekinthető, enélkül a széntüzelésű gőzerőművek jelenlegi 40–41%-os hatásfoka 48–49%-ra növelhető. Szuperötvözetek esetén a szuperkritikus gőzerőművek hatásfoka az 50%-ot is túl lépheti.

A hatásfokjavítás mellett a széntüzelésű szuperkritikus erőművek fejlesztésének másik fontos célkitűzése a rugalmas üzemvitel biztosítása. Megfelelő anyagválasztással és konstrukcióval az igényeknek megfelelően növelik a terhelésváltoztatási sebességet, az ugrásszerű teljesítményváltozások nagyságát és végső soron csökkentik a min/max teljesítményarányt.

**b)** A szénerőművek fejlesztésének másik főiránya szénbázis esetén is a kombinált gáz/gőzkörfolyamatú erőmű megvalósítása [22–29]. Ennek vizsgált elvi lehetőségeit a 3.5. ábra foglalja össze. E téren a fejlesztés irányai a következők:

Egyik lehetőség a nyomásalatti szénelgázosításhoz kapcsolt kombinált gáz/gőzerőmű (Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC). A szénhidrogén-tüzelésű kombinált gáz/gőzerőműhöz képest a különbség az, hogy a kombinált erőművet megelőzi a szénelgázosítás. A szénelgázosítás két ok miatt is rontja a kombinált szénerőmű hatásfokát. Egyrészt a szénelgázosításnak van vesztesége, ez nem túl jelentős (kisebb 5%-nál). A hatásfokot nagyobb mértékben rontja az elgázosító hő- és villamos önfogyasztása, különösen pedig az, hogy az elgázosítás folyamán nemcsak fűtőgáz keletkezik, hanem gőz is, amelyet kisebb hatásfokkal lehet hasznosítani a gáz/gőzkörfolyamatban, mint a szénből előállított fűtőgázt.



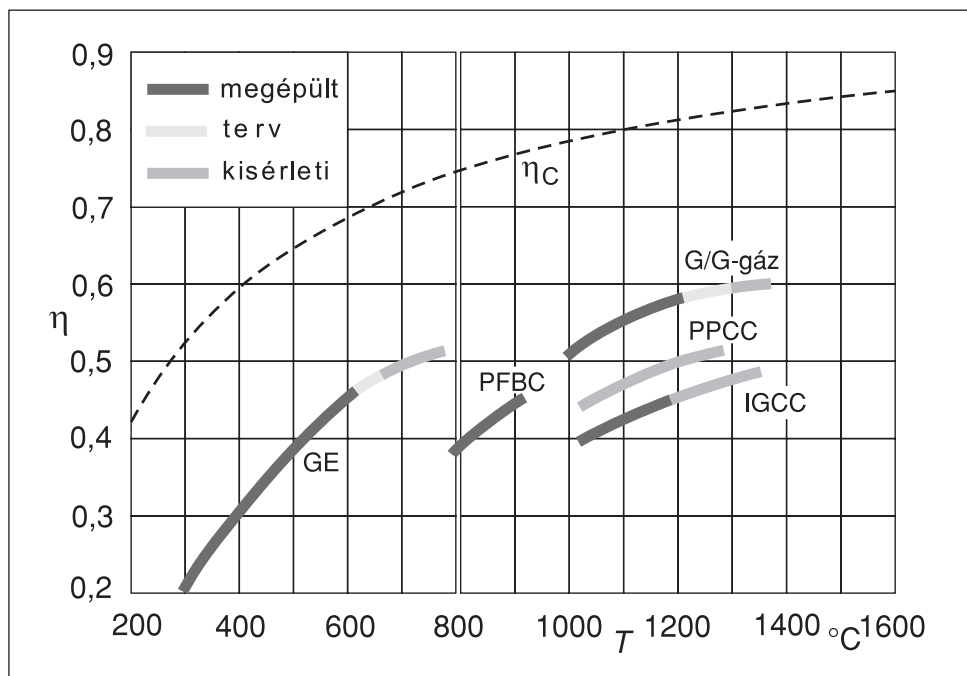
3.5. ábra. Szénbázisú kombinált gáz/gőzerőművek vizsgált típusai

Szénbázis esetén a gáz- és gőzkörfolyamat integrálása megvalósítható feltöltött kázanban. A hőforrás nyomásalatti fluidágyas széntüzelés (Pressurized Fluidized Bed Combustion – PFBC). A berendezés fluidágyáról gázt bocsát a gázturbinába, az ágy merülő felületei pedig a gázturбина hőhasznosítójával együttműködve gőzt termelnek. A fluidkazan önmagában kis távozó gázhőmérsékletet (800–900 °C) enged meg a nyitott gázturбина számára (1. generáció), amit vagy rátüzeléssel lehet növelni (2. generáció), vagy az ághőt lényegesen jobb hatásfokú zárt (He) gázkörfolyamatban lehet hasznosítani.

A nyomásalatti szénportüzelésű kazán (Pressurized Pulverized Coal Combustion – PPCC) tisztított füstgázait közvetlenül a gázturbinába vezetjük. Ez a folyamat egyszerűnek és kedvezőnek tűnik, fejlesztésére eddig még kevés információ áll rendelkezésre, de a jövőben ezt tekintik az egyik perspektivikus irányzatnak.

Szénbázison külső hevítésű kombinált erőmű (Externally Fired Combined Cycle – EFCC) is megvalósítható. A nyitott gázturbina munkaközege levegő, amelyet komprimálás után keramikus fűtőfelületen keresztül hevítünk atmoszférikus tűzterű kazánban, majd az expandált levegőt égési levegőként vezetjük a kazánba. A léghevítéssel párhuzamosan a kazán gőzt is termelhet.

A különböző típusú szénénergiával már elérhető és a jövőben tervezett hatásfokokról a 3.6. ábra és a 3.3. táblázat ad tájékoztatást. Az ábrán az összehasonlítás lehetőségét nyújtja az  $\eta_C$ -vonal, a maximális hőmérséklettel számolt Carnot-ciklus hatásfoka, és a G/G-gáz-vonal, a földgázüzelésű gáz/gőzerőmű hatásfokvonalát. A fejlesztett szénénergiátípusok hatásfokában lényeges különbség nem állapítható meg.



3.6. ábra. Különböző típusú szénénergiával elérhető és tervezett hatásfoka

3.3. táblázat. Szénénergiával elérhető és tervezett hatásfoka, %

A szénénergiátípusa	Elérhető hatásfok	Tervezett hatásfok
Hagyományos szuperkritikus gőzerőmű	45	50
Szénégázosító gáz/gőzerőmű	45	50
Nomásalatti fluidtüzelésű gáz/gőzerőmű	42–45	47
Nomásalatti szénportüzelésű gáz/gőzerőmű	–	>50

### 3.2.3. Hazai szénerőmű-építési lehetőségek

2020-ban hazai szénerőművet csak új egységek létesítése biztosíthat. Új szénerőműként biztonsággal a már kiforrott technológiával rendelkező szénporttüzelésű szuperkritikus gőzerőmű-egységekkel, ennek is két lehetőségével számolhatunk: korszerű lignittüzelésű erőműegység(ek) létesítésével a már üzemelő lignitbánya és -erőmű bázisán, vagy import kőszénre korszerű szénerőmű-egység(ek) építésével. Ugyanis a fluidtüzelésű gőzkazán, illetve a szénelgázosításhoz vagy nyomásalatti fluidkazánhoz kapcsolódó gáz/gőzerőművek jelenleg fejlesztés stádiumában vannak, még nem tekinthetők kereskedelmi egységeknek. (Gyors fejlesztés esetén természetesen ezek alkalmazása sem zárható ki.)

Mai megítélés szerint a szóba jövő korszerű gőzerőmű-egységek jellemzői a következők lehetnek:

- szénporttüzelés, alacsony  $\text{NO}_x$ -kibocsátó tüzelőrendszer, villamos pernyeleválasztó, nedves füstgáz-kéntelenítő. Lignittüzelés esetén megvizsgálandó a szén víztelenítése az égéshő (felső fűtőérték) hasznosítása érdekében,
- a gőzerőmű szuperkritikus nyomású, kellően nagy frissgőz és újrahevítési hőmérséklettel, nagy tápvíz-hőmérséklettel, mindenképpen martenzites, esetleg ausztenites hőálló acélok alkalmazásával,
- a szénerőmű-egység villamos teljesítőképességét – a magyar erőműrendszer nagyságára és a tartandó szekunder tartalékokra tekintettel – mintegy 400–500 MW nagyságban lehet megállapítani,
- a szénerőmű-egységeknek rugalmas üzeműnek kell lenniük, relatíve kis minimális terhelést és nagy terhelésváltoztatási sebességet kell megkívánni, jelentős részt kell vállalniuk az erőműrendszer menetrendtartásában, viszonylag nagy évi kihasználási időtartam (4000–6000 h/év) mellett,
- a szénerőmű-egységek kondenzációs rendszerűek, hiszen telepítési helyükön számottevő hőigénnyel feltehetően nem számolhatunk, a távolsági hőszállítás jelenleg nem időszerű.

Az építendő lignit vagy kőszén erőmű nagysága – elég széles határok között – szabadon választható meg. Az erőmű nagyságát lényegesen befolyásolja a hazai földgáz-felhasználás és beszerzés helyzete, reálisan 2–4 egység létesítésével számolhatunk. Egy szénerőmű-egység mintegy 1,6–2,5 TWh, az összes szénerőmű pedig 5–10 TWh villamos energiát termelhet évente.

A korszerű szénerőművektől magas energetikai hatékonyságot kell elvárunk. Lignit esetén legalább 43%-os névleges hatásfokot kell elérni, de a lignit tüzelés előtti víztelenítése esetén 48%-os hatásfok is megvalósítható. Import kőszénre telepítendő szénerőmű 48–50% hatásfokú lehet.

A szénerőművek beruházási költségei a fosszilis erőművek kategóriájában viszonylag magasak. A fajlagos beruházási költségekre – 1000–2000 MW erőműteljesítménytartományban – a következő becslések tehetők:

- |                               |           |                |
|-------------------------------|-----------|----------------|
| • kőszén erőműegységek esetén | 1000 €/kW | 260 000 Ft/kW, |
| • lignit erőműegységek esetén | 1300 €/kW | 338 000 Ft/kW. |

A kőszén árát a beszerzés és a nagy távolságú szállítás költségei elég egyértelműen meghatározzák. Jelenleg a kőszén ára 600 Ft/GJ körüli, a jövőben is csak mérsékelt növekedése várható.

A hazai lignit ára nehezebben értelmezhető. A lignit árát döntő mértékben a lignitbánya megnyitásának és gépsorainak beruházási költségei (ezek mintegy 300 €/kW= 78 000 Ft/kW értékkel növelik a fajlagos beruházási költségeket), a bányaművelés folyóköltségei, majd bányászat után a tájrehabilitáció költségei határozzák meg. Ezek együttesen is lignitre a kőszénárnál kisebb árat eredményeznek.

A szénerőművek megítélésének egyik fontos jellemzője a szén *könnyű tárolhatósága*. A hazai villamosenergia-ellátás biztonságát növeli, hogy az import kőszén nagy mennyiségben egyszerűen és veszteségmentesen tárolható, a lignit pedig folyamatosan rendelkezésre áll. A kőszén beszerzésére és szállítására, illetve a kőszén-erőmű telephelyére több lehetőség van. Ezeket versenyeztetni lehet, és az optimális lehetőség a versenyeztetés alapján választható ki.

### **3.2.4. Szénerőművek telepítése és környezeti hatásai**

Az új lignitbázisú erőműegységek telephelyét a jelenleg is üzemelő ligniterőmű megszabja. Kérdés az lehet, hogy az új egységeket a Mátrai Erőműbe vagy Bükkábrány térségébe célszerű-e telepíteni. Az előbbi mellett a meglévő erőmű-infrastruktúra, az utóbbi mellett a lignitvagyon elhelyezkedése szól, döntés a konkrét tervezéskor hozható meg. A kőszéntüzelésű egységeket valamelyik meglévő, megfelelő infrastruktúrával rendelkező erőműbe indokolt létesíteni, ahová a szénszállítás kedvezően megoldható, és ahol esetleg nagyobb kapcsolt energiatermelésre is lehetőség nyílik.

Új szénerőmű létesítése esetén lényegesek a környezeti kérdések [30, 31]. Három környezeti hatást indokolt kiemelni és kell kezelni: a tájbaillesztést (a), a lokális légszennyezések csökkentését (b) és a globális klímahatást (c).

**a)** Korábban az ipari létesítmények, köztük az erőművek *tájbaillesztésének* nem voltak szigorú követelményei. Az erőművek megfelelő beillesztése a környezetbe egyre fontosabb, különösen ligniterőművek esetén. A szénerőművek környezetbe illesztésének három sajátos kérdése:

- A *külfejtéses lignitbánya* nagy területen és hosszú ideig okoz káros beavatkozást a természeti környezetben. A bányászati műveletek után szükséges a táj folyamatos rehabilitációja, elsősorban fásítással. Az erdőtelepítés szebbé teszi a tájat, és a nyári vegetációs időszakban csökkenti a légkör széndioxid tartalmát. Új külfejtések nyitását – ezen kedvezőtlen környezeti hatások miatt – a társadalmi mozgalmak határozottan ellenzik. Meg kell említenünk a füstgáz kéntelenítéshez szükséges mézskő-bányászat tájromboló hatását is.
- A szénerőművek nagy területet vesznek el a természetől *szén és salak tárolására*. A tároló terek elkerülhetetlen porzása környezetszennyező. A salak és pernye kiszállítása jelentős vízmennyiséget igényel és szennyez. A vízmennyiséget és a porzást számos fejlesztéssel csökkentették, de a salaktér mindenképpen rontja a tájképet, talaj- és légszennyezést okoz. A tárolás gondjait csökkentheti a salak és a pernye más célú (út, építés) hasznosítása.
- A vízfelhasználás csökkentése, illetve a *vízgazdálkodás* minden gőzerőműnél fontos feladat. A szénerőműveknél még inkább, mert a szénerőművek gyakran vízszegény területeken létesülnek, és a salakszállítás és -tárolás is vízigenyes.

**b)** A szénerőművek *lokális légszennyezői* a pernye, a kén-dioxid és a nitrogén-oxid kibocsátás. Ezek csökkentésére megfelelő technológiákat (villamos porleválasztókat,

füstgáz-kéntelenítő eljárásokat, alacsony  $\text{NO}_x$  tüzelőrendszereket) fejlesztettek ki, amelyekkel betarthatók a szigorú környezeti előírások. (A meglévő szénerőművek leállítását ilyen leválasztó berendezések hiánya is indokolta.) A légszennyezést csökkentő füstgáz-kéntelenítő alkalmazása esetén jelentős mennyiségű gipsz keletkezik, ennek tárolása szintén a szénerőművek feladata.

c) Szénerőművek esetén legnagyobb a *globális klímaváltozást* előidéző erőművi fajlagos széndioxid kibocsátás. Kedvező hatások mellett a szénerőmű fajlagos széndioxid kibocsátása

$$e_{\text{CO}_2} = \frac{s_{\text{CO}_2}}{\eta} = \frac{100 \cdot 3,6}{0,43 - 0,5} \cong 0,7 - 0,8 \text{ kg/kWh},$$

ha lignit és kőszén eltüzelése esetén átlagosan  $s_{\text{CO}_2} \cong 100 \text{ kg/GJ}$  széndioxid felszabadulással számolunk (ami mintegy kétszerese a földgáz eltüzelésénél keletkező értéknek). A kibocsátás kisebb értéke kőszén-, nagyobb értéke lignittüzelésre jellemző.

### 3.3. Kondenzációs szénhidrogén nagyerőművek

A szénhidrogén-tüzelésű erőművek több szempontból csoportosíthatók, és meglehetősen tarka képet mutatnak. A leglényegesebb csoportosítás, hogy közvetlenül csak villamos energiát termelnek vagy kapcsoltn hőt és villamos energiát. A csak villamos energiát termelő gőzerőművek a kondenzációs erőművek.

Erőműrendszerünkben jelenleg  $3 \times 150 = 450 \text{ MW}$  és  $10 \times 215 \text{ MW} = 2150 \text{ MW}$  kondenzációs erőmű van. A 150 MW-os egységek már régebb óta nem üzemelnek, ezek gyakorlatilag már szanálásra kerültek.

Az erőműrendszer kapacitásfejlesztésének kulcskérdése a rendszernek jelenleg gerincét jelentő, nagynyomású és újrahevítéses *215 MW-os gőzblokkok további sorsa*. E blokkok hatásfoka mintegy 36%, élettartamuk hamarosan túllépi a tervezett értéket [32–34]. Sorsuk kettős lehet:

a) teljesítmény- és hatásfoknövelő gázturbinás korszerűsítéssel biztosítjuk a blokkok további üzemeltetését, vagy

b) lényegében teljesen szanáljuk ezeket a blokkokat, és kiesett teljesítményüket új szénhidrogén (vagy szén) bázisú erőműegységek építésével pótoljuk.

Ezt a kérdést érinti, hogy a szénhidrogén hőszolgáltató erőművek fejlesztése mellett (3.5. pont) milyen szerep vár a kondenzációs szénhidrogén erőművekre.

#### 3.3.1. A 215 MW-os gőzblokkok gázturbinás korszerűsítése

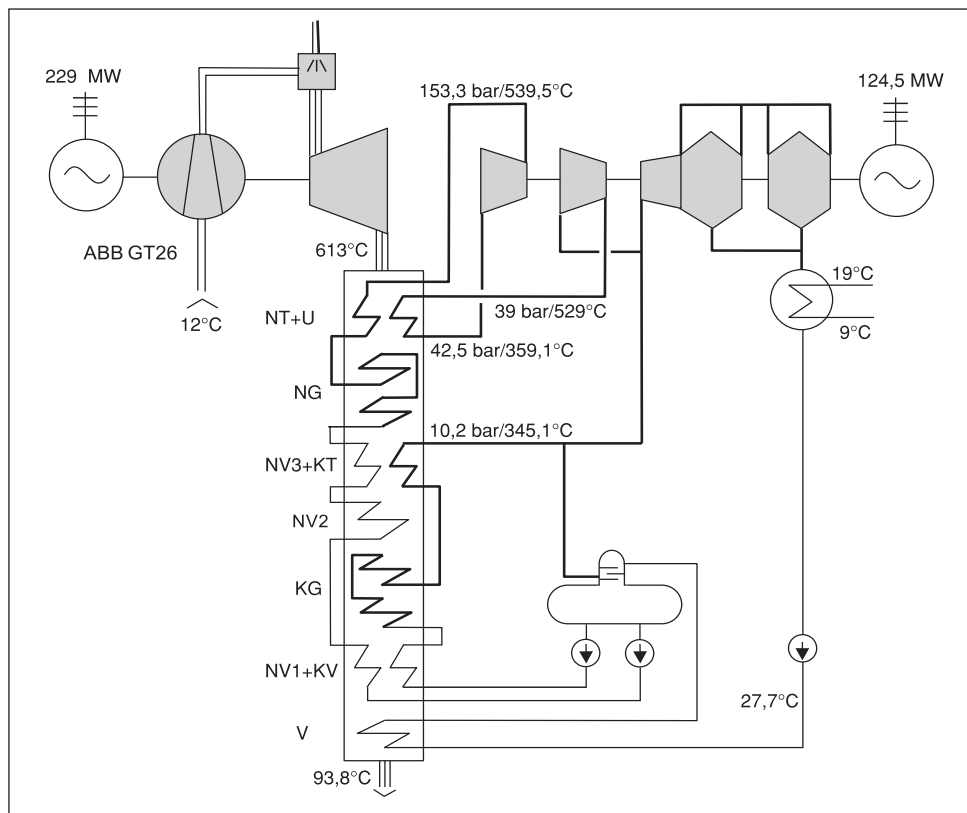
A 215 MW-os gőzerőmű-egységek *gázturbinás korszerűsítése* több változatban valósítható meg. Néhány lehetőség, amelyekben a gőzturbina teljesítménye változatlan (215 MW) marad:

- Legnagyobb hatásfokot és legnagyobb villamos teljesítményt a gázturbinás fejlesztés nyújtja, amelynél a gázturbina/gőzerőmű teljesítményaránya 2:1. A  $2 \times 215 \text{ MW}$ -os gázturbinából és a 215 MW-os gőzturbinából 645 MW villamos teljesítményű kombinált gáz/gőzerőmű-egység hozható létre, mintegy 57% körüli hatásfokkal, ha az alkalmazott gázturbinák hatásfoka 38%.

- Megvalósítható egy 215 MW-os gázturbina és a 215 MW-os gőzturbina együttműködése, amikor a gázturbina/gőzerőmű teljesítményaránya 1:1. Az együttműködő erőművek villamos teljesítménye 430 MW, és mintegy 50% hatásfok érhető el, ha az alkalmazott gázturbina hatásfoka 38%.
- A 215 MW-os gőzturbina kisebb villamos teljesítményű (pl. 145 MW-os) gázturbinával is együttműködhet, ekkor a gázturbina/gőzerőmű teljesítményaránya <1. Az így létrejövő együttműködés pl. 360 MW villamos teljesítményt eredményez, mintegy 45% hatásfok mellett, ha a választott gázturbina hatásfoka 34% körüli.

E változatok különböző kombinációival az erőműrendszer villamos teljesítménye nagyon jelentős mértékben, igen kedvező hatásfokkal és a legkisebb beruházási költségekkel növelhető. A gőzerőmű maradó részének (gőzturbina, hűtőrendszer, villamos berendezések) élettartama megvizsgálandó, de feltehetően ezek üzemideje könnyen növelhető. A gőzturbina megtartása kapcsán vizsgálandó, hogy a meglévő négyházas, három kiömlésű gőzturbina helyett célszerű-e új, a gázturbina hőhasznosításához jobban illeszkedő korszerű gőzturbinát építeni. A korszerűsítendő egységek számát befolyásolja és korlátozhatja, hogy a kapcsolt energiatermelés fejlesztésének függvényében milyen teljesítő-képességű kondenzációs szénhidrogén erőműkapacitást lehet/indokolt fenntartani.

Példaként a 3.7. ábra az eredetileg széntüzelésű Reinhafen erőmű gázturbinás fejlődésének hőkapcsolását mutatja be [35]. A fejtelt erőmű hatásfoka 57%.



3.7. ábra. Az eredetileg széntüzelésű Reinhafen erőmű gázturbinás fejlődése

### 3.3.2. Új kombinált gáz/gőzerőművek

Új, csak villamos energiát termelő szénhidrogén-tüzelésű erőműként gyakorlatilag a kombinált gáz/gőzerőművek jöhetnek szóba [36–44]. Szénhidrogén-tüzelés esetén ezek jobb hatásfokuk következtében teljesen kiszorították a gőzerőműveket, köztük a szuperkritikus nyomású egységeket. A korszerű kombinált gáz/gőzerőmű-egységek villamos teljesítménye 100–400 MW között, hatásfokuk 54–60% között változik. A korszerű kombinált egységek általában egytengelyes megoldásban épülnek, amelynél a gázturbina és a gőzturbina egyetlen tengelyen van, és a blokk egyetlen villamos generátorral rendelkezik. A kombinált gáz/gőzerőművek az esetek nagy részében kapcsolt hőkiadást is végeznek.

Az egyes gyártó cégek korszerű gázturbináinak és kondenzációs gáz/gőzerőműveinek jellemzőit a 3.4. táblázat mutatja be.

3.4. táblázat. Korszerű gázturbinák és kombinált gáz/gőzerőművek jellemzői

Gázturbinák jele	Önálló gázturbina		Kombinált gáz/gőzerőmű		Növekedés aránya
	villamos teljesítménye MW	hatásfoka %	villamos teljesítménye MW	hatásfoka %	
<i>Siemens</i>					
V64.3A	70	34,5	103	54,8	1,49
V84.3A	170	38,0	254	57,9	1,52
V94.3A	240	38,0	359	58,1	1,53
<i>General Electric</i>					
9E	123	33,8	184	50,7	1,50
9FA	226	35,7	353	55,2	1,55
9G	282	39,5	420	58	1,49
<i>ABB</i>					
KAX100	43	37,0	62	54,0	1,46
KA13E2	159	35,1	244	53,9	1,54
KA24/26	165/241	37,5/37,8	251/365	58,0/58,5	1,55/1,55
<i>Westinghouse</i>					
501DA	120	34,5	170	48,6	1,41
501FA	160	35,5	240	53,1	1,50
501G	230	38,5	345	58,0	1,50
701G	310	38,5	465	58,0	1,50

A gáz/gőzerőműveken belül néhány egytengelyes (háromnyomású gőztermelés, újrahevítés) gáz/gőzerőmű-egység jellemzőit a 3.5. táblázat ismerteti.

A kapcsolt energiatermelés nélküli, korszerű gáz/gőzerőművek figyelembe vehető jellemzői a következők:

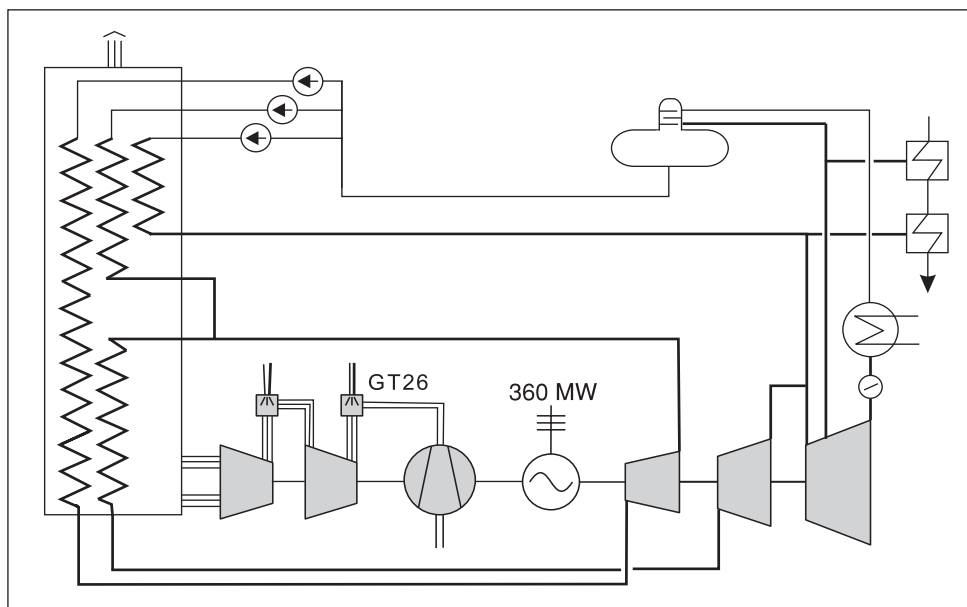
- a kombinált gáz/gőzerőmű-blokk villamos teljesítménye 300–400 MW, amelyben a gázturbina/gőzturbina teljesítményaránya mintegy 2:1,



- a gázturbina hőhasznosítójában háromnyomású gőztermelés és újrahevítés valósul meg,
- a legújabb kombinált gáz/gőzerőművek egytengelyes kivitelben, egyetlen generátorral létesülnek,
- a kombinált gáz/gőzerőmű-blokk villamosenergia-termelésének névleges hatásfoka 50–60% között változik, a legkorszerűbb gázturbinákhoz kapcsolódó egységek hatásfoka eléri az 58–60%-ot,
- a szénhidrogén-tüzelésű gáz/gőzerőművek feladata a menetrendtartás, várható évi kihasználási időtartamuk 3000–5000 h/év-re tehető.

3.5. táblázat. Egytengelyes kombinált gáz/gőzerőmű-blokkok jellemzői

	ABB	GE	Siemens
Gázturbina típus	GT26	MS9001FA	V94.3A
Kombinált blokk jelle	KA 26-1	S-109FA	GuD 1S.94.3A
Gázturbina nettó teljesítménye	W	240	226,5
Nyomásviszony		30	15
Kompresszor fokozatszám		22	17
Turbina belépő hőmérséklete	°C	1150	1288
Égők száma		30/24	14
Egytengelyű blokk nettó teljesítménye	MW	365	353,5
A blokk nettó hatásfoka	%	58,5	55,2



3.8. ábra. Egytengelyes gáz/gőzerőmű háromnyomású gőztermeléssel és újrahevítéssel

Egytengelyes, háromnyomású újrahevítéses kondenzációs gáz/gőzerőmű kapcsolását példaként 3.8. ábra mutatja. A kondenzációs blokkból természetesen hő is kiadható.

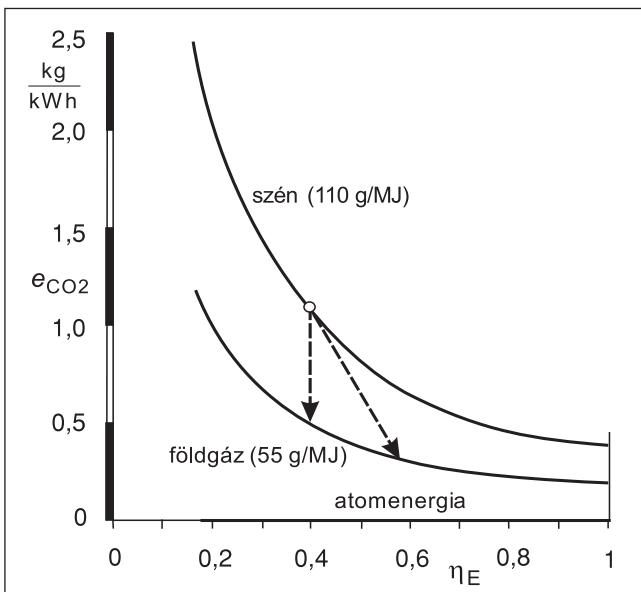
### 3.3.3. A kondenzációs szénhidrogén erőművek hazai szerepe

A kondenzációs szénhidrogén erőművek hazai jövőjét illetően vizsgálandó fontosabb kérdések a következők:

- Ebből az erőműtípusból mekkora kapacitást kell, illetve indokolt létesíteni, figyelembe véve más erőművek, különösen a hőszolgáltató szénhidrogén erőművek indokolt fejlesztését;
- Annak a kérdésnek az eldöntése, hogy a 215 MW-os gőzblokkokat indokolt-e gázturbinákkal korszerűsíteni, vagy új gáz/gőzerőműveket célszerűbb-e építeni, a létesítésben érintettek kompetenciája;
- A kombinált gáz/gőzerőművek kézenfekvő tüzelőanyaga a földgáz, de alternatívan üzemeltethetők megfelelő olajtermékekkel is. A földgázellátás és az üzemanyag-gazdálkodás két fontos kérdése, hogy egyrészt mennyi kondenzációs szénhidrogén gáz/gőzerőmű létesíthető, másrészt a földgáz-felhasználás csúcsidejében a gázturbinák milyen tüzelőanyagot használjanak.
- A szénhidrogén kombinált gáz/gőzerőmű fajlagos beruházási költsége mintegy 600 €/kW (156 000 Ft/kW). A földgáz jelenlegi ára 1100 Ft/GJ, 2020-ban 1700–1800 Ft/GJ gázár várható.
- A földgáztüzelésű kondenzációs gáz/gőzerőmű fajlagos széndioxid kibocsátása

$$e_{\text{CO}_2} = \frac{s_{\text{CO}_2}}{\eta} = \frac{55 \cdot 3,6}{0,58} \cong 0,34 \text{ kg/kWh}$$

kevesebb mint fele a szén-erőművekének, a jobb hatásfok és mivel földgáz eltüzelése esetén kevesebb,  $s_{\text{CO}_2} \cong 55 \text{ kg/GJ}$  széndioxid keletkezik. A hatásfokjavítás és az üzemanyag-váltás hatását a fajlagos széndioxid kibocsátásra a 3.9.ábra mutatja.



3.9. ábra. A tüzelőanyag és a hatásfok hatása a fajlagos széndioxid kibocsátásra

## 3.4. Decentralizált fosszilis erőművek

Az erőművek fejlesztésének több évtizeden keresztül meghatározó tendenciája volt az egységteljesítmény növelése. Az egységteljesítmény növelését indokolta a hatásfoknövelés, különösen pedig a fajlagos beruházási költségek csökkentése. Az egységteljesítmény növelésével együtt járt, hogy a dugattyús gőzgépeket és belső égésű motorokat az erőművekben kiszorították a gőzturbinák, illetve a gázturbinák. A nagy egységek létesítése szükségessé tette az erőművek együttműködését, a villamoshálózatok létrehozását.

Az utóbbi időszakban viszont a koncentrált erőművek mellett és helyett a decentralizált villamosenergia-termelés előretörése figyelhető meg. A decentralizált erőművek széleskörű elterjedését az energiastruktúra változása, a jobb minőségű primerenergiák (gázolaj, földgáz) előretörése tette lehetővé, mert ezeknél kisteljesítmények esetén is jó hatásfokú berendezések valósíthatók meg, amelyek bizonyos szintű környezetvédelmi előírásoknak is megfelelnek. A decentralizált energiatermelés elterjedésének kedvezett a koncentrált energiaellátás miatt kiépített villamoshálózatok megléte, gazdaságosságát pedig gyakran a kapcsolt hő- és villamosenergia-ellátás biztosította. A fosszilis decentralizált energiatermelés elterjedését számos egyéb hatás is kíséri, mindenekelőtt az, hogy a megújuló energiák hasznosítása is decentralizált berendezésekben valósul meg. A decentralizált energiatermelés új technológiák (mikrogázturбина, tüzelőanyag-cella) és új energiarendszerek (pl. hidrogén-energetika) létrehozását ösztönzi. Jelenleg nem becsülhető meg, hogy a mikrogázturbinák, tüzelőanyag-cellák és egyéb új rendszerek elterjednek-e olyan mértékben, hogy a villamosenergia-rendszerre gyakorolt hatásuk számottevő legyen.

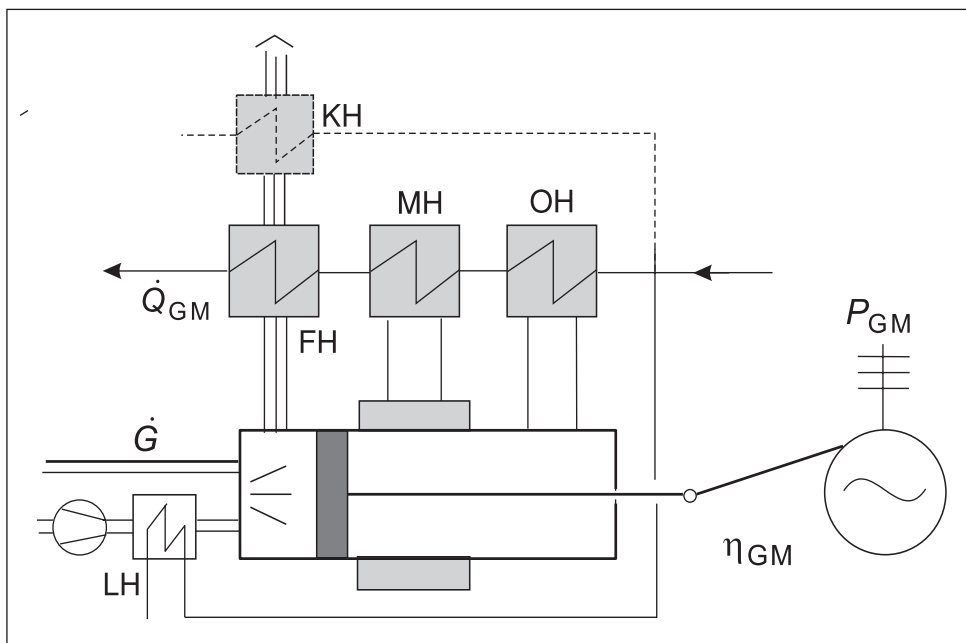
### 3.4.1. Dugattyús gépek, gázmotorok

Említettük, hogy a nagy erőművekben a gőzturbinák és a gázturbinák kiszorították a dugattyús gőzgépeket és a belső égésű motorokat. A decentralizált energiatermelés térhódításakor fordított folyamat zajlik. Gőzerőművek esetén kisteljesítményeknél a gőzturbinát korszerű *Stirling*-motorok válthatják fel. Ezek széleskörű elterjedésére a decentralizált fosszilis erőművekben nem számíthatunk, mert kisteljesítményű gőzerőműveket fosszilis primerenergiákra nem építenek. (A *Stirling*-motorok pl. naperőművekben terjedhetnek el.) A decentralizált fosszilis erőművekben elsősorban a gázturbinát felváltó gázmotorok nagyarányú megjelenését tapasztaljuk.

A 20. század utolsó évtizedében – a korszerű nagyteljesítményű gázturbinák mellett – a technikai globalizáció másik széles körben elterjedt berendezését a kisteljesítményű gázmotorok jelentették. Hazai elterjedésüket jelzi, hogy megjelenésüktől számítva egy évtized alatt mintegy 150 gázmotor létesült több mint 180 MW kumulált villamos teljesítménnyel [45]. A kezdeti években inkább néhány száz kW-os egységek, az utóbbi években átlagosan közel 3 MW, maximum 6 MW villamos teljesítményű gázmotorok épültek.

A gázmotorokat szinte kivétel nélkül kapcsolt energiaellátásra létesítették. A hőszolgáltató gázmotor felépítését a 3.10. ábra mutatja, amely  $\dot{G}$  tüzelőhő-teljesítményből  $P_{GM}$  villamos és  $\dot{Q}$  hőteljesítményt állít elő. A kiadható hő több forrásból tevődik

össze: a turbófeltöltő utáni levegő- vagy keverékhűtőből (LH), az olajhűtőből (OH), a motorhűtőből (MH) és a távozó füstgázok hűtőjéből (FH). A helyi hőellátásban adódhat olyan alacsony hőmérsékletű hőhasznosítás, amely lehetővé teszi a füstgázok harmatpont alá hűtését (KH), azaz a fűtőérték helyett az égéshő hasznosítását (*kondenzációs gázmotorok*) [46].



3.10. ábra. Hőszolgáltató gázmotor felépítése

Néhány üzemi tulajdonságban is kedvezőbbek a gázmotorok a gázturbináknál. A külső levegőhőmérséklet függvényében a gázturbina jellemzői erőteljesen változnak, a gázmotoroké alig. Hasonlóan kedvezőbb alakul a gázmotor hatásfoka a terhelés függvényében, mint a gázturbináé.

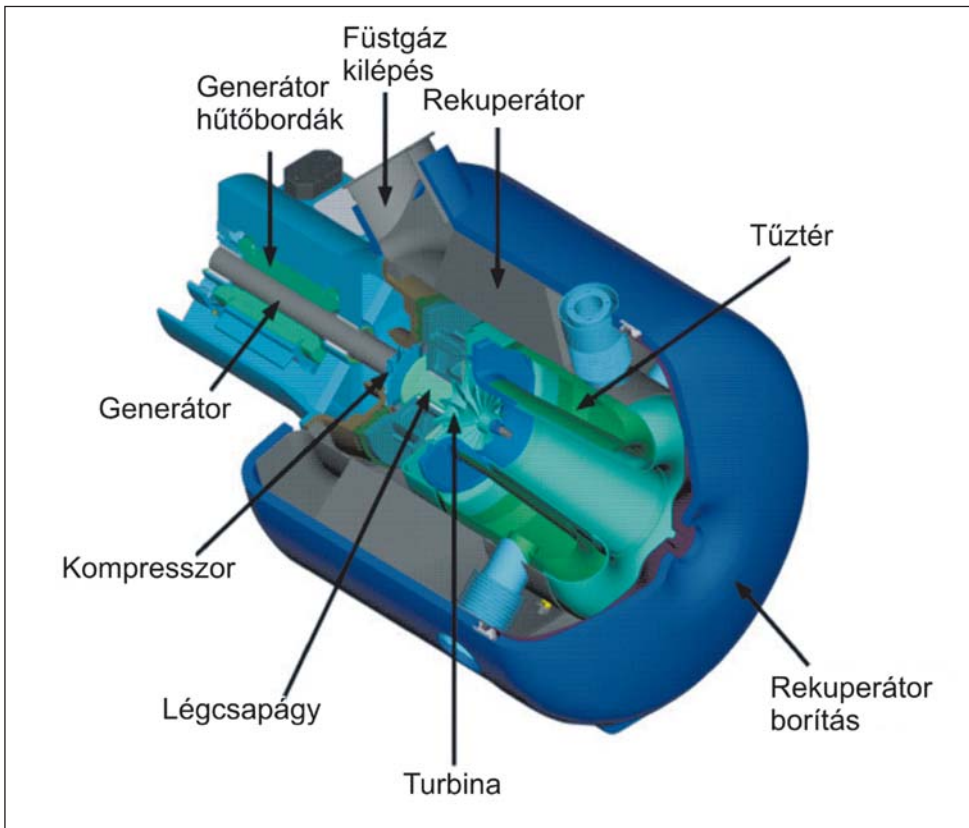
A gázmotorok konstrukciójában és korszerűségében meghatározó szerepet játszik a nagyszámú járműmotor fejlesztésében és üzemeltetésében szerzett összefogás és tapasztalat. Az egyes cégek által gyártott típusok Otto- vagy dízelmotorok, különböző (sovány és gazdag) üzemanyag-keverékeket használnak, az energetikai szempontok mellett a környezetvédelmi követelményeknek, elsősorban az alacsony NO<sub>x</sub>-kibocsátásnak is megfelelnek.

A gázmotorok fejlesztésében még további eredmények várhatók. Maximális teljesítőképességük jelenleg 5–6 MW, de tervezik 15–20 MW-os, és ennél nagyobb egységek építését is. Hatásfokuk (36–42%) már jelenleg is jóval felülmúlja a gázturbináét, a dízelmotorok hatásfoka már közelíti az 50%-ot. Különleges kialakítású, izotermikus kompressziót közelítő motorokkal pedig már a 60% megközelítését tekintik célnak.

### 3.4.2. Mikrogázturbinák

A jövőben tervezik egészen kisteljesítményű gázturbinák, ún. mikrogázturbinák alkalmazását. Ez a jövőkép annyiban meglepő, hogy kisteljesítményekre a dugattyús gépeket előnyösebbnek tartjuk a turbináknál, amit a gázmotorok és a fűtőgázturbinák versenye meggyőzően alátámaszt. Ugyanakkor a rosszabb minőségű tüzelőanyagok (hulladékgáz, biogáz) esetén és egészen kisteljesítményeknél a mikrogázturbinák előnyösebbé válhatnak.

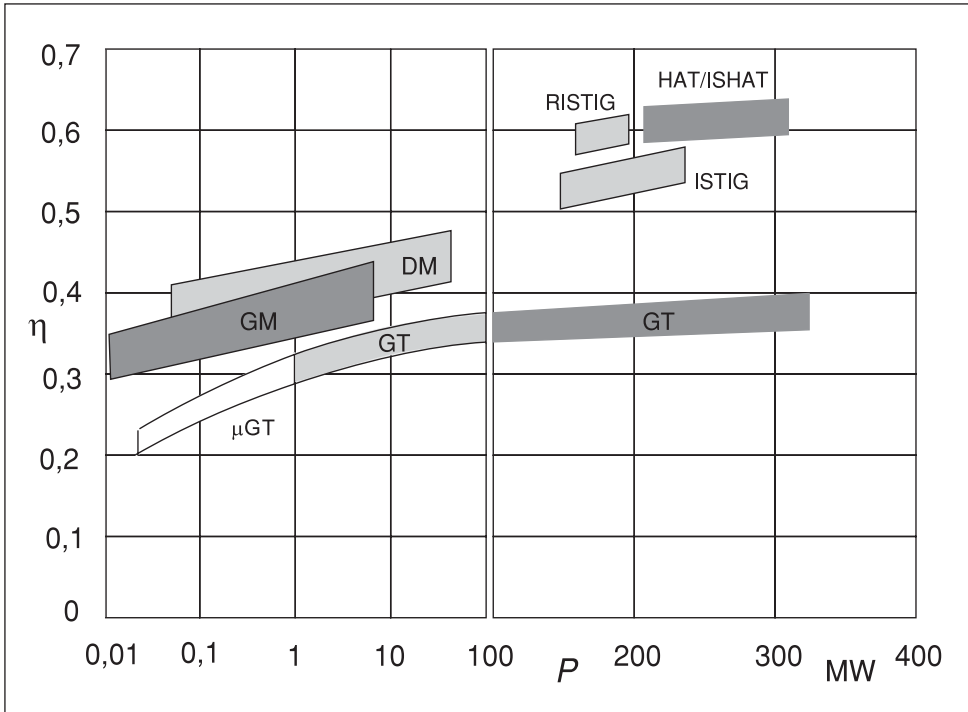
A 30–60 kW nagyságrendű gázturbinák felépítését lényegesen leegyszerűsítették (3.11. ábra). Az egyszerű kompresszor-tüzelőtér-turbina-generátor kompakt egységet alkot, amelyhez nem járulnak kiegészítő rendszerek, mint hűtés, szivattyú, hajtómű. Az egyszerű felépítésüknél fogva üzemük megbízható, karbantartási igényük kicsi [47].



3.11. ábra. Mikrogázturbina felépítése

A gázturbinák tüzelőtere a különböző minőségű, kedvezőtlen tüzelési tulajdonságokkal rendelkező tüzelőanyagokhoz jobban illeszthető, mint a dugattyús gépeké. Például a mikrogázturbinák alkalmasak kismennyiségű, elszórta jelentkező hulladékgázok, biogázok helyi értékesítésére. Mikrogázturbinákat terveznek a nagyhőmérsékletű tüzelőanyag-cellából kilépő gázok hasznosítására is.

A megvalósított és tervezett, nagy és mikrogázturbinák, illetve gázmotorok több évtizedes fejlődéséről és az elért hatásfokokról a 3.12. ábra ad tájékoztatást. A gázturbinák villamos teljesítménye <10 kW és >300 MW között változik, tehát az ábra több nagyságrendet hidal át.



3.12. ábra. Különböző nagyságú gázturbinák és gázmotorok elért, illetve tervezett hatásfoka

Az utóbbi időben nagyon gyorsan elterjedt, 100 MW-nál nagyobb teljesítményű erőművi gázturbinák (GT) hatásfoka önmagában szerény, csak 30–40% között változik. Elterjedésüket nem saját kedvező hatásfokuk magyarázza, hanem – egyszerű felépítésükön túl – a rájuk épülő rendszerek (gázturbinás kapcsolt energiatermelés, kombinált gáz/gőzerőmű stb.) jó hatásfoka, illetve hatékonysága. A nagyteljesítményű erőművi gázturbinák várható saját hatásfoka a hővisszavezetés, a gőzbefecskendezés (ISTIG, RISTIG) és a légnedvesítés (HAT, ISHAT) sikeres alkalmazásától függ. A sajátkörű hőhasznosítás 50–60% közötti hatásfok elérését teszi lehetővé, de az optimista becslések 60% fölötti hatásfok elérését is várják [38, 41].

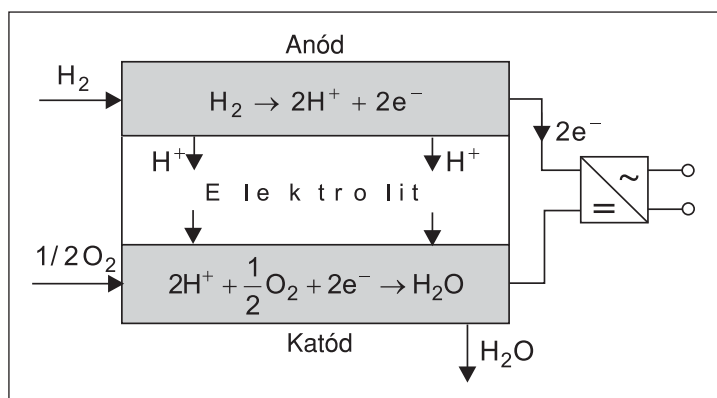
A decentralizált energiaellátásban a kisteljesítményű gázturbinák (GT) és a gázmotorok (GM) versenyeznek, a gázmotorok, különösen a dízelmotorok (DM) versenyelőnyben vannak. Az egészen kisteljesítményű mikrogázturbinák ( $\mu$ GT) hatásfoka (20–30%) csak a teljesítményükhöz és a felhasznált hulladékgázokhoz mérten megfelelő, vagy egyéb rendszerekhez, pl. nagy hőmérsékletű tüzelőanyag-cellákhoz kapcsolódva biztosítanak megfelelő rendszerhatásfokot.

### 3.4.3. Tüzelőanyag-cellák

A hagyományos tüzelőanyag kötött energia  $\rightarrow$  hő  $\rightarrow$  mechanikai munka  $\rightarrow$  villamos energia átalakítás egyes lépcsőinek kihagyásaival is állítható elő villamos energia. Gyakorlatilag két lehetőség jön számításba: villamos energia közvetlen előállítás hőből vagy tüzelőanyagból. Mindkettőből hiányzik a mechanikai munka fokozat, azaz ezek az eljárások mozgógép nélküli villamosenergia-termelést jelentenek.

Korábban vizsgálták a hő termoelemes, termoionos és magnetohidrodinamikus átalakítását villamos energiává. Ezek a kísérletek nem hoztak átütő sikert.

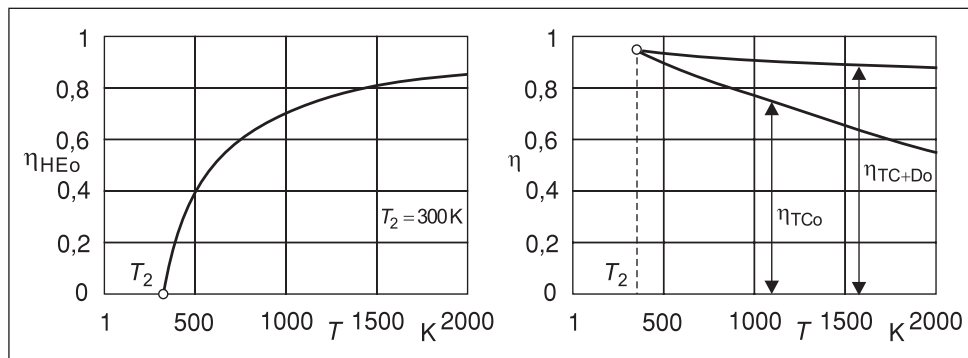
Lényegesen jobbák az eredményei és kilátásai a jelenleg vizsgált tüzelőanyag-celláknak (fuel cells), amelyek a tüzelőanyagból – a reagensek közötti elektrokémiai reakciók révén – közvetlenül villamos energiát termelnek. Az átalakításból kimaradhat a hőtermelés és a hőkörfolyamat, illetve nem jelenik meg a mechanikai munka.



3.13. ábra. A tüzelőanyag-cella működése hidrogén esetén

A tüzelőanyag-cella működésének elvét a 3.13. ábra szemlélteti, amely a hidrogén kémiai energiáját alakítja át közvetlenül villamos energiává [48]. A tüzelőanyag-cella anódos oldalára áramlik a redukáló, hidrogéntartalmú tüzelőanyag, a katódos oldalra pedig oxidáló közegként

oxigént vagy levegőt vezetnek. A tüzelőanyag-cellában a hidrogén és az oxigén elektrokémiai reakciójából végső soron víz keletkezik, egyidejűleg az anód és a katód között elektronok áramlanak, azaz egyenáram jön létre, amit inverterben váltakozó árammá alakíthatunk.



3.14. ábra. Eszményi erőmű és tüzelőanyag-cella hatásfoka a hőmérséklet függvényében

A hőmérséklet szerepe az energiaátalakításban. A hagyományos hőerőmű és a tüzelőanyag-cella hatásfokának összehasonlítását – eszményi viszonyok feltételezésével – a 3.14. ábrán követhetjük a hőmérséklet függvényében. Az eszményi hőerőmű hatásfoka a Carnot-hatásfok

$$\eta_{\text{HEo}} = 1 - \frac{T_2}{T},$$

ahol  $T$  a hőközlés,  $T_2$  a hőelvonás hőmérséklete. Tüzelőanyag-cella esetén a tüzelőanyaggal bevitt hőből ( $G=\Delta H$ , ahol  $\Delta H$  a reakció termékeinek és reagenseinek entalpia-különbsége)  $\Delta G=\Delta H-\Delta S$  szabadentalpia-különbség (*Gibbs-potenciál*) alakul át villamos energiává, ahol  $\Delta S$  a reakció termékeinek és reagenseinek entrópiakülönbsége. A tüzelőanyag-cella hatásfoka a hőmérséklet függvényében

$$\eta_{\text{TCo}} = \frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H}.$$

Amíg a hagyományos hőerőmű hatásfoka a hőmérséklettel monoton nő, addig a tüzelőanyag-cella hatásfoka annál nagyobb, minél kisebb hőmérsékleten megy végbe az átalakulás. Ezt mutatja a 3.6. táblázat veszteségmentes  $\text{H}_2/\text{O}_2$  tüzelőanyag-cella esetén.

3.6. táblázat. Veszteségmentes hőerőmű és tüzelőanyag-cella hatásfoka [20]

Hőmérséklet $T$ K	Hőerőmű hatásfoka $\eta_{\text{HEo}} = 1 - \frac{T_2}{T}$	Termék fázisa	Entalpia $\Delta H$ kJ/mol	Gibbs- potenciál $\Delta G$ kJ/mol	Tüzelőanyag- cella hatásfoka $\eta_{\text{TCo}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$
300	0	folyadék	285,8	237,4	0,83
300	0	gőz	242,0	228,7	0,94
400	0,25	gőz	243,0	224,0	0,92
500	0,40	gőz	243,9	219,2	0,90
1000	0,70	gőz	247,8	192,8	0,78
2000	0,85	gőz	242,2	135,2	0,54

A hőmérsékletnöveléssel ugyan csökken a tüzelőanyag-cella hatásfoka, de nő a  $T$  hőmérsékleten távozó  $D=T\Delta S_t$  disszipációs hő, ahol  $\Delta S_t$  a  $T$  hőmérsékletű reakció termék (pl. víz vagy gőz) entrópiakülönbsége. A disszipációs hőt kapcsolt hőszolgáltatásra vagy hőerőműben hasznosíthatjuk. Ha eszményi hőerőműbe vezetjük, akkor

$$\Delta E_{\text{Do}} = D\eta_{\text{HEo}} = T\Delta S_t \left(1 - \frac{T_2}{T}\right)$$

többet villamos energiát nyerünk. A hőhasznosító erőművel kiegészített tüzelőanyag-cella eredő eszményi hatásfoka

$$\eta_{\text{TC+Do}} = \frac{\Delta G + \Delta E_{\text{Do}}}{G} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} + \frac{T\Delta S_t}{\Delta H} \left(1 - \frac{T_2}{T}\right).$$



A 3.14. ábra azt is mutatja, hogy a disszipációs hő hasznosításával a tüzelőanyag-cella hatásfoka csak alig csökken a hőmérséklet növelésekor, és az eszményi hatásfok minden hőmérsékleten közel egységnyi.

A tüzelőanyag-cellák felépítése és típusai. A tüzelőanyag-cellák több típusát fejlesztik. A fejlesztett típusok:

- alkáli tüzelőanyag-cella (Alkaline Fuel Cell – AFC),
- polimer-elektrolit membrános tüzelőanyag-cella (Polymere Electrolyte Membrane Fuel Cell – PEMFC),
- foszforsavas tüzelőanyag-cella (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC),
- folyékony karbonátos tüzelőanyag-cella (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC),
- szilárd oxidos tüzelőanyag-cella (Solide Oxide Fuel Cell – SOFC).

A fejlesztett tüzelőanyag-cellák fontosabb jellemzőiről a 3.7. táblázat ad tájékoztatást. Az adatok pillanatképet adnak, pl. a hatásfok gyorsan nő.

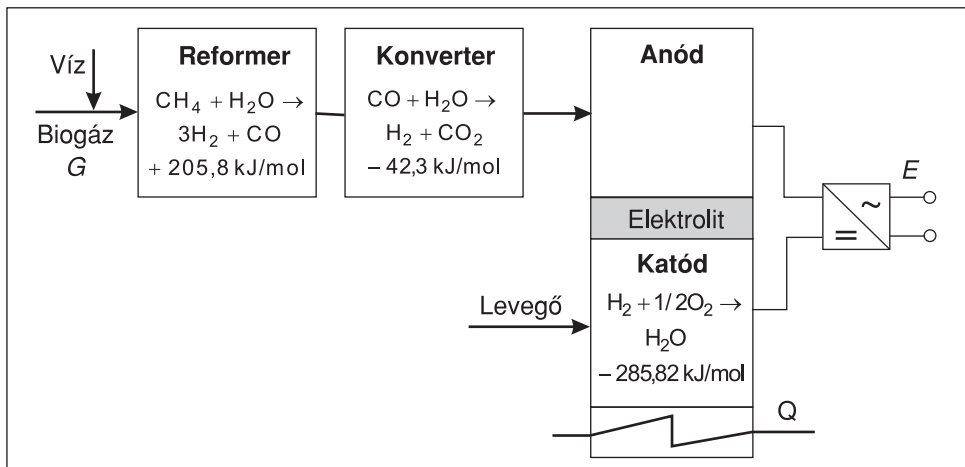
3.7. táblázat. A fejlesztett tüzelőanyag-cellák jellemzői

Jele	Hőmérséklet °C	Tüzelő- anyag (anód)	Elektrolit, iontranszport	Oxidáló közeg (katód)	Villamos hatásfok %	Alkalmazás	
AFC	40-200	hidrogén	káliúg (KOH) $\leftarrow OH^-$	oxigén	40-50	közlekedés (mozgó)	
PEMFC	80		polimer $H^+ \rightarrow$	levegő, oxigén	40-55		
PAFC	200	földgáz, széngáz, biogáz	foszforsav ( $H_3PO_4$ ) $H^+ \rightarrow$	levegő	40-45	hő és villamos energia (stabil)	
MCFC	650		karbonátok ( $Li_2CO_3+K_2CO_3$ ) $\leftarrow CO_3^{2-}$		50-60		villamos energia
SOFC	800-1000		keramikus anyag ( $ZrO_2$ ) $\leftarrow O^{2-}$		50-60		decentralizált erőművek

A táblázatból kitűnik, hogy az eltérő felépítésű tüzelőanyag-cellák különböző tüzelőanyagok felhasználására alkalmasak és különböző hőmérsékleteken működhetnek. Az alacsony hőmérsékletű cella tüzelőanyag-előkészítést igényel, a magashőmérsékletűek pedig, további villamosenergia-termelést vagy hőkiadást tesznek lehetővé.

A 3.15. ábra példaként biogáz-felhasználás és kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés mellett mutatja a tüzelőanyag-cella folyamatát [49, 50]. A biogáz 60-65%-ban metánt tartalmaz, a maradék zömmel szénmonoxid. A biogázt (G) először a reformerbe vezetjük, ahol metántartalma a túlhevített gőzzel – nikkeltalizátor jelenlétében, mintegy 900 °C hőmérsékleten – hidrogénné és szén-monoxiddá alakul át. Ezt követő konverterben a szénmonoxid tartalomból – rézkatalizátor jelenlétében, mintegy 300 °C hőmérsékleten – hidrogén és széndioxid keletkezik. A tüzelőanyag-cella anódjához végeredményben hidrogénben gazdag gáz kerül. A hidrogén kémiai energiája a tüze-

lőanyag-cella elektrokémiai folyamatában magas hőmérsékleten villamos energiává ( $E$ ) alakul. A tüzelőanyag előkészítése és energiaátalakítási folyamata eredőben hőtermeléssel jár, ennek megfelelően alakul ki a tüzelőanyag-cella hőmérséklete és hőtermelése. Ezt a hőt vagy veszteségként kell elvonni, vagy hasznosan adhatjuk ki ( $Q$ ).

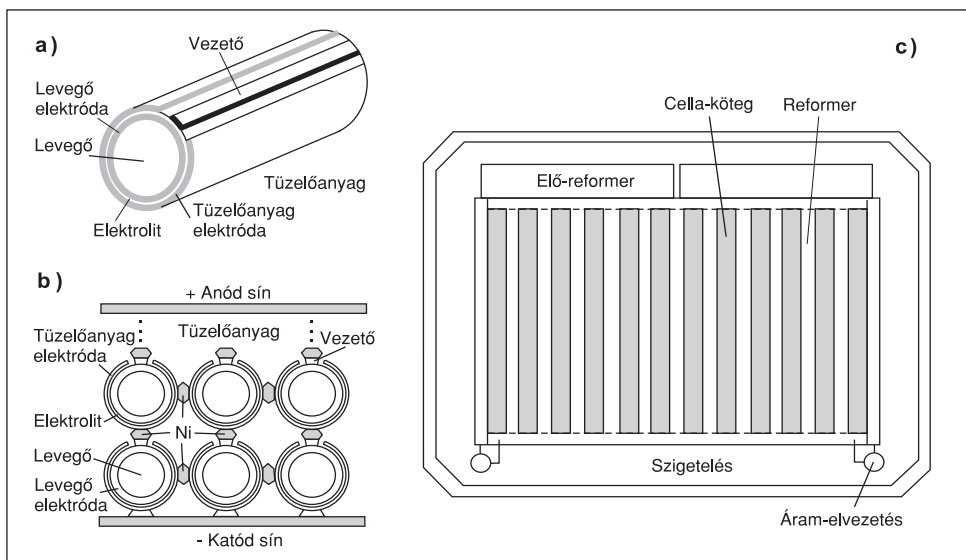


3.15. ábra. Biogáz-felhasználású tüzelőanyag-cella hő- és villamosenergia-termelése

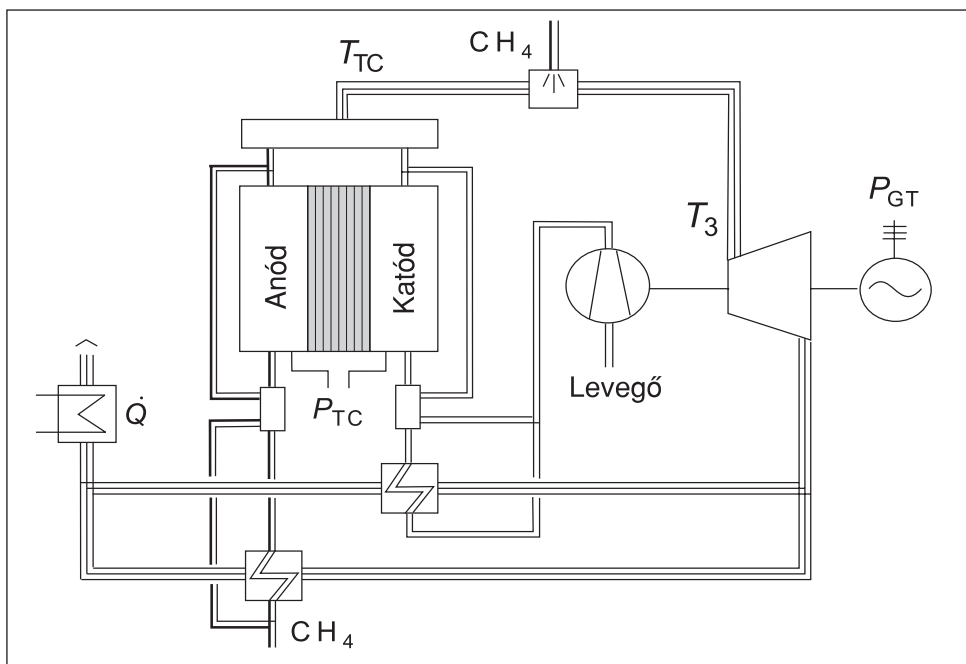
A tüzelőanyag-cella felépítését példaként a 3.16. ábra szemlélteti csőalakú SOFC típus esetén [48]. A tüzelőanyag-cella csőalakú elemét az a) ábra mutatja. A belső csőben (levegő-elektrodában) áramlik a levegő. A külső cső a tüzelőanyag-elektroda, amit a tüzelőanyag vesz körül. A két cső közötti tér az elektrolit. A csőelem részét képezi a villamos összekapcsolást biztosító vezető. A csőelemekből összeállított csőköteg a b) ábrán látható. A csövek érintkezését Ni-filc akadályozza meg, a csövek közötti teret a tüzelőanyag tölti ki. A csőköteg áramtermelését az anód és katód sínek fogják össze. A teljes tüzelőanyag-cella számos csőkötegből áll (c). A csőkötegek közötti tér a tüzelőanyag-reformer, amit még elő-reformerek előznek meg. A generátor elvi felépítése utal a cellát körülvevő szigetelésre, a burkolatra, és mutatja az áram kivezetést.

A teljes tüzelőanyag-cella igen nagyszámú elemből áll. A megvalósított 100–200 kW villamos teljesítményű tüzelőanyag-cellák esetén az elemek száma több mint 1000, a tervezett 1 MW nagyságú cella 6–10000 elemet tartalmaz.

**A tüzelőanyag-cellák és mikrogázturbinák összekapcsolása.** A nagyhőmérsékleten üzemelő tüzelőanyag-cellákból kilépő gáz túl nagy hőmérsékletű, ezt még villamosenergia-termelésre is lehet, és célszerű felhasználni [51]. A 3.17. ábra nagyhőmérsékletű tüzelőanyag-cellát és mikrogázturbinát kapcsol össze. A tüzelőanyag-cellából kilépő gázok hőmérséklete  $T_{TC}$ . Ezt a megfelelő nyomású gázt az ábrán közvetlenül vezetjük a gázturbinába, de lehetséges, hogy a kilépő hőt hőcserélőn keresztül adjuk át a gázturbinába lépő komprimált levegőnek. Ha a tüzelőanyag-cellából kilépő hőmérséklet nem elég magas a gázturbiná számára, akkor rátüzeléssel növelhetjük hőmérsékletét a kívánt  $T_3$  szintre (az ábra ilyen esetet mutat). A gázturbinából kilépő hőt részben a tüzelőanyag és a komprimált levegő előmelegítésére lehet hasznosítani, részben értékesíthető ( $Q$ ). A villamos teljesítmény két részből adódik, a tüzelőanyag-cella egyenáramot ( $P_{TC}$ ), a



3.16. ábra. SOFC típusú tüzelőanyag-cella csőeleme (a), csőkötege (b) és teljes felépítése (c)



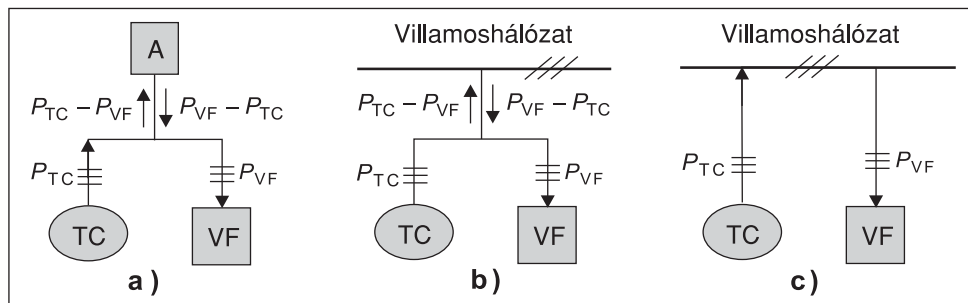
3.17. ábra. Nagyhőmérsékletű üzemanyag-cella és mikrogázturbina összekapcsolása rátüzeléssel

mikrogázturbina váltakozó áramot ( $P_{GT}$ ) termel ( $P = P_{CT} + P_{GT}$ ). A bevitt eredő tüzelőhő-teljesítmény a tüzelőanyag-cella-ba bevitt ( $\dot{G}_{TC}$ ) és a gázturbina előtti rátüzelésnél felhasznált ( $\dot{G}_{RT}$ ) tüzelőhő-teljesítmény összege ( $\dot{G} = \dot{G}_{TC} + \dot{G}_{RT}$ ).

A tüzelőanyag-cella és mikrogázturbina összekapcsolása csak villamosenergia-termelés esetén növeli a villamosenergia-termelés hatásfokát. Kapcsolt energiatermelés esetén a tüzelőanyag hasznosítási hatásfok az összekapcsoláskor nem változik, de nő a villamos és hőteljesítmény  $(P_{CT} + P_{GT})/Q$  aránya.

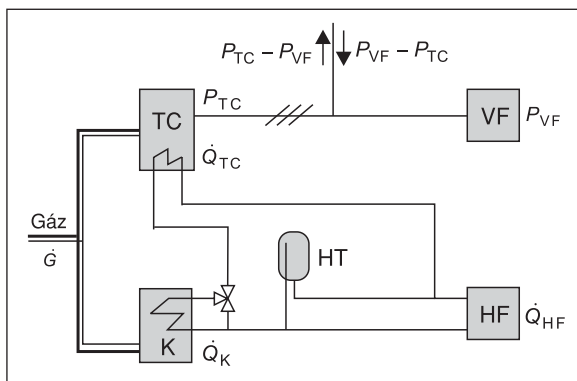
*Tüzelőanyag-cella és az energiaellátás.* A tüzelőanyag-cella elsődlegesen a villamosenergia-ellátásban vesz részt, de kapcsolt energiatermelés esetén a hőellátásban is szerepet vállalhat. A viszonylag kis teljesítményű berendezések elsősorban az egyedi vagy helyi energiaellátás forrásai lehetnek.

Villamosenergia-ellátásban a tüzelőanyag-cellák néhány szóbajövő lehetőségét a 3.18. ábra szemlélteti. Az a) változat szigetüzemet jelent, amelyben az adott villamos fogyasztót – villamoshálózati csatlakozás nélkül – egyedül a tüzelőanyag-cella látja el. Ez a megoldás elsősorban a villamoshálózattól távol eső fogyasztóknál vetődik fel és lehet indokolt. A fogyasztói teljesítményigények  $(P_{VF})$  ingadozását a tüzelőanyag-cella termelése  $(P_{TC})$  általában nem tudja követni, tehát a szigetüzemben akkumulátorokat kell alkalmazni, amely felveszi a  $P_{CT} - P_{VF}$  többlettermelést, és pótolja a  $P_{VF} - P_{CT}$  teljesítményhiányt. A b) változatban az adott fogyasztót szintén az érintett tüzelőanyag-cella látja el, de a többlettermelést a közeli villamoshálózat veszi fel, és ugyancsak ebből a villamoshálózatból vételezhető a teljesítményhiány. Mind az a), mind a b) változatban a tüzelőanyag-cella létesítésében a villamos fogyasztó érdekelt, ha nem fér a villamoshálózathoz, vagy célszerűbbnek tartja a saját termelést. A c) változatban a tüzelőanyag-cella a (rendszerint kiszűrésű) villamoshálózatra dolgozik, lényegében független konkrét villamos fogyasztó ellátásától. Ilyen tüzelőanyag-cella létesítésében kevésbé a fogyasztó, sokkal inkább a (gáz vagy villamos) szolgáltató lehet érdekelt.



3.18. ábra. Tüzelőanyag-cella a decentralizált villamosenergia-ellátásban, a) szigetüzem, b) sajátellátás hálózati kapcsolattal, c) hálózati csatlakozással, TC tüzelőanyag-cella, VF villamos fogyasztó, A akkumulátor

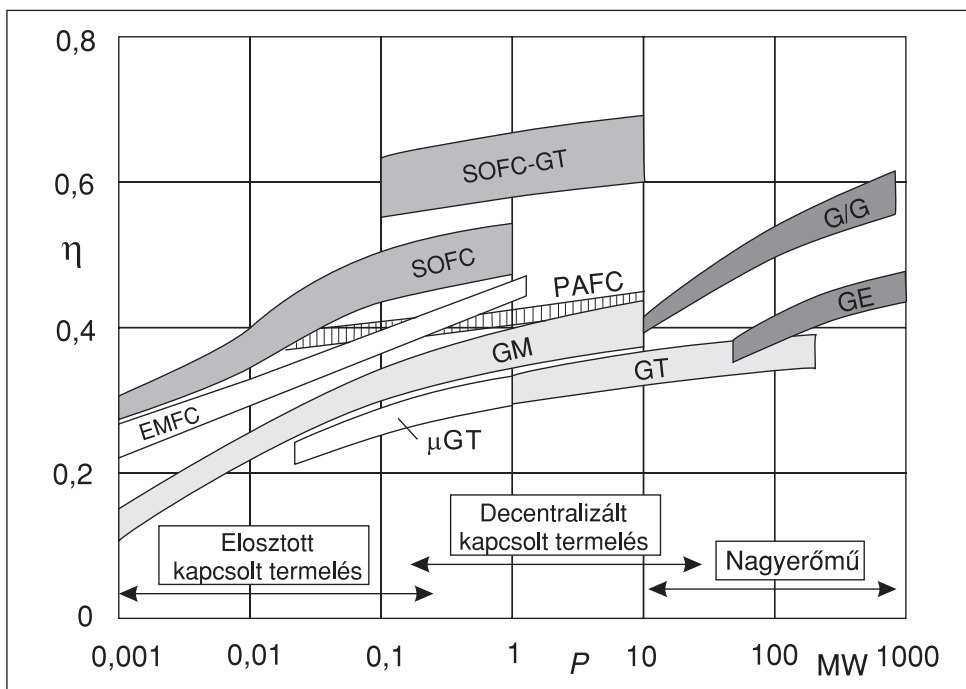
A tüzelőanyag-cella alkalmas kommunális vagy ipari fogyasztó egyvezetékes energiaellátására (3.19. ábra). A fogyasztó egyetlen energiavezetékhez, a gázhálózathoz csatlakozik. A tüzelőanyag-cella kapcsolt energiatermeléssel ellátja a fogyasztó villamosenergia-igényét a 3.18. ábra a) vagy b) változata szerint. A fogyasztó jelentősen változó hőigényének  $(Q_{HF})$  alapterhelését a tüzelőanyag-cella fedezi  $(Q_{TC})$ , amit csúcsidőben kazán  $(Q_K)$  egészít ki. A tüzelőanyag-cella kötött villamos menetrendje indokolhatja hőtároló (HT) beépítését is. Távhőrendszer közelsége esetén a kazán és a hőtároló alkalmazása egyaránt feleslegessé válhat.



3.19. ábra. Tüzelőanyag-cella egyvezetékes energiaellátásban, TC tüzelőanyag-cella, K kazán, HT hőtároló, VF villamos fogyasztó, HF hőfogyasztó

látásban gázmotorok (GM), mikrogázturbinák ( $\mu$ GT) és bizonyos tüzelőanyag-cellák (EMFC, PAFC, SOFC) szerepelnek, a decentralizált energiatermelésben rajtuk kívül megjelenik a gázturbina (GT), illetve a tüzelőanyag-cella és a mikrogázturbina kombinációja (SOFC-GT). Nagyerműként gázturbinák (GT), gőzerőművek (GE) és kombinált gáz/gőzerőművek (G/G) szerepelnek. A technika fejlődésének köszönhetően, jelenleg kis teljesítmények esetén rendelkezésre állnak ugyanakkora hatásfokú berende-

A nagyteljesítményű és a decentralizált fosszilis erőművek hatásfokát a 3.20. ábra hasonlítja össze a villamos teljesítmény igen széles tartományában, 1 kW és 1000 MW között [52]. A 200 kW-nál kisebb villamos teljesítményű erőművek az elosztott energiatermelés, a 200 kW és 20 MW közöttiek a decentralizált energiatermelés berendezései, többnyire kapcsolt energiatermeléssel, az e fölöttiek tekinthetők nagyerműveknek. Az elosztott (dispersed) energiael-



3.20. ábra. Különböző típusú koncentrált és decentralizált erőművek hatásfoka

zések, mint az egészen nagy teljesítményeknél. Nagyteljesítményű erőművek között a kombinált gáz/gőzerőművek hatásfoka közelíti a 60%-ot, de a kisteljesítményű tüzelőanyag-cella és mikrogázturbina kombinációja is eléri, sőt meghaladhatja ezt az értéket. A jövő villamosenergia-ellátásában tehát kis és nagy teljesítmény esetén igen jó hatásfokú erőműveket vehetünk, s kell számításba vennünk.

#### **3.4.4. Decentralizált energiatermelés és a hidrogénenergetika**

A decentralizált energiaellátás megítélését – a saját energetikai és gazdasági jellemzőkön túl – további hatások is befolyásolják. Két hatásra mindenképpen érdemes utalni:

Az egyiket a *villamos hálózatra* gyakorolt befolyások jelentik. Előnyös, hogy a fogyasztókhoz közel telepített decentralizált energiatermelők mindenképpen csökkentik a villamos hálózat veszteségeit. Ugyanakkor a villamos hálózat tartaléktartására, üzemére és szabályozására gyakorolt hatásokat is vizsgálni kell, különösen a decentralizált energiatermelés növelésének függvényében.

A másik a *környezet hatás*. A decentralizált energiatermelés feltétele a megfelelő minőségű primerenergia, elsősorban a földgáz rendelkezésre állása. Ily módon a környezetvédelmi előírások egyes esetekben kielégíthetők, de eredőben a decentralizált energiatermeléssel mégiscsak a fogyasztókhoz, tehát a lakott területekre visszük a fosszilis primerenergiák környezetet szennyező kibocsátásait (a közlekedés szennyezőihez hasonlóan). Ezt a helyi szennyezést lehet kiküszöbölni a jövőben előírányzott *hidrogén-rendszerekkel*, mert hidrogén használata esetén nem keletkeznek helyben a környezetre káros termékek [53].

A hidrogén-energetika előnyét jól ismerjük, megvalósítására is számos lehetőséget javasoltak. A megvalósításnak két fő kérdéskörére kell utalnunk:

Az egyik kérdés az, hogy hidrogén a természetben nem áll rendelkezésre. A *hidrogén előállításának* több lehetősége ismert és jöhet szóba, de ezek célszerűségét még nem tudjuk megbízhatóan megítélni. Az előállításához energia, pl. villamos energia kell, és a hidrogéntermelés akkor lehet környezetbarát, ha a szükséges villamos energiát környezetkímélő forrásból (pl. víz vagy más megújuló energia) állítjuk elő.

A másik kérdés az, hogy a hidrogént a decentralizált energiaellátásban *milyen technológiával* használjuk fel. A hidrogén felhasználható belső égésű motorokban (a gázmotorok analógiájára) vagy tüzelőanyag-cellákban.

A hazai energetika feladata, hogy folyamatosan figyelemmel kísérje a hidrogénenergetika nemzetközi fejlődésének hasznosítható eredményeit.

### **3.5. Kapcsolt energiatermelő szénhidrogén erőművek**

A kapcsolt energiatermelést jelenleg is nagyrészt szénhidrogén-tüzelésű erőművek valósítják meg, az elavult hőszolgáltató szén-erőművek szanálásával pedig szinte kizárólag szénhidrogén erőművek végeznek kapcsolt energiatermelést. Az erőműrendszer fejlesztése szemszögéből érdemes áttekinteni, hogy a kapcsolt energiatermelés hogyan befolyásolja az érintett erőművek energetikai hatékonyságát.

A kapcsolt energiatermelés feltétele a *hasznos hő*, végső soron az erre vonatkoztatott jellemzők képezik az energetikai, gazdasági és környezeti jellemzésének és megítélésé-

nek alapját [45, 54]. A kapcsolt energiatermelés ugyanakkor *része a villamosenergia-rendszernek* is, ennek fejlesztése szempontjából is ismernünk kell hatásait, lehetőségeit és korlátjait.

### 3.5.1. A kapcsolt energiatermelés mutatói

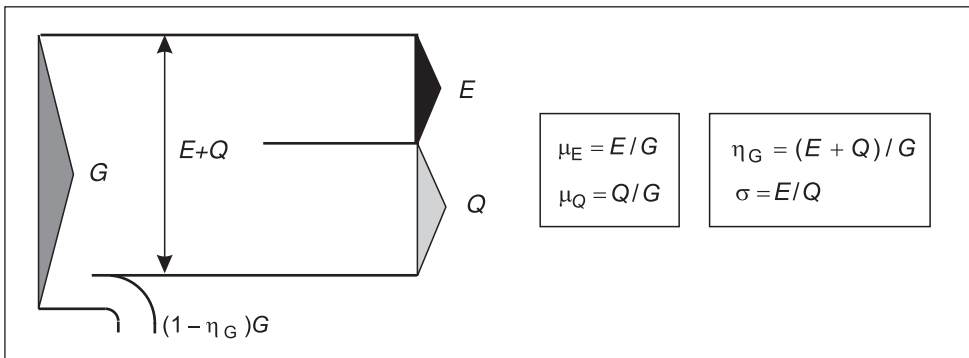
A  $G$  primerenergiából két terméket,  $E$  villamos energiát és  $Q$  hőt előállító kapcsolt energiatermelés energetikai jellemzésére egy mutató nem elégséges, ehhez két független energetikai mutató szükséges (3.21. ábra) [55]:

Az egyik mutató-pár pl. a kapcsolt energiatermelés veszteségeit, illetve a tüzelőanyag-hasznosítást kifejező *mennyiségi hatások*

$$\eta_G = \frac{E+Q}{G} = \frac{1}{g_G}$$

és a különböző értékű energiatermékek arányát kifejező *fajlagos kapcsolt villamosenergia-termelés*

$$\sigma = \frac{E}{Q}.$$



3.21. ábra. A kapcsolt energiatermelés energetikai mutatói

Természetesen az a kedvező, ha  $\eta_G$  és  $\sigma$  értéke egyaránt nagy, azaz jó a tüzelőanyag hasznosítása, és a kapcsolt energiatermelés termékei között nagy az értékesebb villamos energia aránya.

A másik mutató-pár pedig pl. a *villamos részhatások* (villamos hozam)

$$\mu_E = \frac{E}{G}$$

és a *termikus részhatások* (termikus hozam)

$$\mu_Q = \frac{Q}{G}.$$

A bemutatott két mutató-pár között természetesen kölcsönös kapcsolat áll fenn. Egyrészt

$$\eta_G = \frac{E}{G} + \frac{Q}{G} = \mu_E + \mu_Q \quad \text{és} \quad \sigma = \frac{\mu_E G}{\mu_Q G} = \frac{\mu_E}{\mu_Q} .$$

Másrészt

$$\mu_E = \frac{\sigma}{1+\sigma} \eta_G = \sigma \mu_Q \quad \text{és} \quad \mu_Q = \frac{1}{1+\sigma} \eta_G = \frac{\mu_E}{\sigma} .$$

A mutatók egyes eljárások esetén megkívánt értékeire az EU-direktíva a 3.8. táblázatban megjelölt referenciaértékeket adja meg.

3.8. táblázat. A kapcsolt energiatermelés megkívánt referenciaértékei az EU-direktívában [54]

Fűtőerőmű-típus	Kapcsolt energiaarány, $\sigma$		Mennyiségi hatások $\eta_G$ , %
	Fűtés	Ipari gőz	
Kombinált gáz/gőzerőmű	0,85	0,75	85
Ellennyomású gőzerőmű	0,45	0,30	75
Kondenzációs fűtőblokk	0,45	0,30	85
Fűtő-gázturbina	0,55	0,40	75
Gázmotor	0,75	0,60	75

Az egyenértékű (azonos mennyiségű hő és villamos) energiaszolgáltatás esetén a kapcsolt energiatermelés révén *elérhető primerenergia-megtakarítás*

$$G_{\text{meg}} = (G_{\text{FM}} + G_{\text{KE}}) - G = \frac{Q}{\eta_{\text{FM}}} + \frac{E}{\eta_{\text{KE}}} - \frac{Q + E}{\eta_G} ,$$

ahol  $\eta_{\text{FM}}$  a közvetlen hőtermelés,  $\eta_{\text{KE}}$  a közvetlen villamosenergia-termelés hatásfoka. Az érzékeltetés érdekében a primerenergia-megtakarítást többféle módon fajlagosíthatjuk.

Vonatkozthatjuk a primerenergia-megtakarítást a *közvetlen villamosenergia-termelés primerenergia-felhasználására*. Az  $\eta_{\text{FM}} = \eta_G$  figyelembevételével ez a fajlagos primerenergia-megtakarítás

$$\alpha_E = \frac{G_{\text{meg}}}{G_{\text{KE}}} = \frac{G_{\text{meg}}}{E / \eta_{\text{KE}}} = 1 - \frac{\eta_{\text{KE}}}{\eta_G} .$$

Ez a fajlagosítás lényegében azt jelenti, hogy a kapcsolt energiatermeléssel elért primerenergia-megtakarítást teljes mértékben önkényesen a villamos energia javára írjuk. Ennek több alapvető hibája van: nem veszi tudomásul, hogy a kapcsolt energiatermelés alapját esetenként adott hasznos hőigény képezi (1), nem szerepel benne a kapcsolt ener-



giatermelés hatékonyságát kifejező  $\sigma$  kapcsolt energiaarány, tehát nem függ a kapcsolt energiatermelés színvonalától (2), és félrevezető, hogy annál nagyobb fajlagos megtakarítást érhetünk el, minél kisebb a közvetlen villamosenergia-termelés hatásfoka (3).

A fajlagosítás célszerű vonatkoztatási alapja a *hasznos hő*. A hasznos hő adott nagyságú igényt fejez ki, tehát  $Q$ -áll. A lényegben nem változtat, de egyszerűsíti a fajlagosítást, ha  $Q$  helyett a hő közvetlen termelésének tüzelőhő-felhasználására vonatkoztatunk:  $G_{FM} = Q/\eta_{FM}$ . Ha a közvetlen hőtermelés és a kapcsolt energiatermelés hatásfokát egyenlőnek vesszük ( $\eta_{FM} = \eta_G$ ), akkor a közvetlen hőtermelés tüzelőhő-felhasználására vonatkoztatott fajlagos primerenergia-megtakarítás

$$\alpha_Q = \frac{G_{\text{meg}}}{G_{FM}} = \frac{G_{\text{meg}}}{Q/\eta_{FM}} = \sigma \left( \frac{\eta_G}{\eta_{KE}} - 1 \right).$$

Az *EU-direktíva* az elérhető primerenergia-megtakarítást a közvetlen hő- és villamosenergia-termeléshez együtt felhasznált primerenergiához viszonyítja. Ebben az esetben – szintén  $\eta_{FM} = \eta_G$  feltételezésével – a fajlagos primerenergia-megtakarítás

$$\alpha_{Q+E} = \frac{G_{\text{meg}}}{G_{FM} + G_{KE}} = \frac{(G_{FM} + G_{KE}) - G}{G_{FM} + G_{KE}} = 1 - \frac{1}{\frac{\mu_Q}{\eta_{FM}} + \frac{\mu_E}{\eta_E}} = 1 - \frac{1 + \sigma}{1 + \frac{\eta_G}{\eta_{KE}} \sigma}.$$

A közvetlen és kapcsolt energiatermelés energetikai összehasonlítását teszik lehetővé az energetikai jelleggörbék. A kapcsolt energiatermelés évi energiamérlege

$$G = E g_E + Q g_Q,$$

amelyben  $g_E$  a villamosenergia-,  $g_Q$  a hőtermelésre terhelt fajlagos primerenergia-felhasználás. Ebből a kapcsolt energiatermelés *energetikai jelleggörbéje*

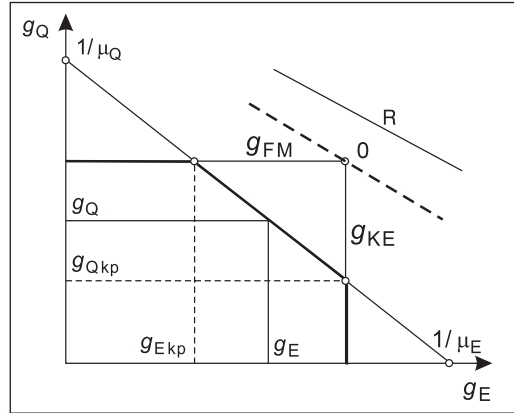
$$g_Q = \frac{G - E g_E}{Q} = \frac{1 + \sigma}{\eta_G} - \sigma g_E,$$

amely a koordinátatengelyeken lévő  $1/\mu_E$  és  $1/\mu_Q$  pontokkal meghatározott egyenes (3.22. ábra). Ha a kapcsolt energiatermelés minden hasznát csak a hőre könnyelik el ( $g_E = g_{KE}$ ), akkor a kapcsolt hőtermelés fajlagos primerenergia-felhasználása általánosan

$$g_{Qkp} = \frac{G - E g_{KE}}{Q} = \frac{1 + \sigma}{\eta_G} - \sigma g_{KE},$$

Az energetikai jelleggörbék feltűntetik a közvetlen villamosenergia-termelés ( $g_{KE}$ ) és a közvetlen hőtermelés fajlagos primerenergia-felhasználását ( $g_{FM}$ ). A  $g_{KE}$  és  $g_{FM}$  érté-

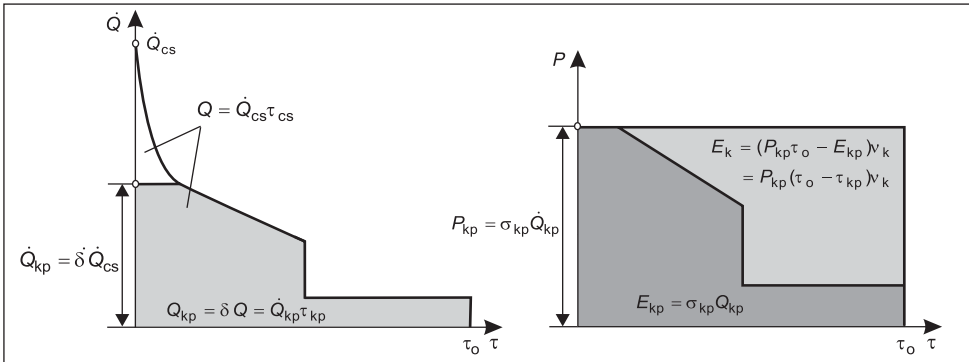
kekkel meghatározott 0 ponton átmenő jelleggörbe esetén a kapcsolt energiatermelés energetikailag közömbös, a közvetlen energiatermeléshez képest sem primerenergia-megtakarítással, sem többlettel nem jár. Az R jelű jelleggörbe pedig a rossz kapcsolt energiatermelést tükrözi, mert primerenergia-felhasználása nagyobb, mint a közvetlen energiatermeléseké. A tüzelőanyag-felhasználás szempontjából a kapcsolt energiatermelés akkor kedvező, ha az energetikai jelleggörbéje metszi a  $g_{KE}$  és a  $g_{FM}$  értékekkel meghatározott téglalapot.



3.22. ábra. A kapcsolt energiatermelés energetikai jelleggörbéje

### 3.5.2. Kapcsolt energiatermelés a villamosenergia-rendszerben

Egy korszerű hőszolgáltató erőműegység többnyire vegyes, tisztán kapcsolt és közvetlen villamosenergia-termelést végez. A megkülönböztetés érdekében itt és a következőkben a tisztán kapcsolt energiatermelést kp-index, a közvetlen villamosenergia-termelést k-index jelöli. A kétféle energiatermelést (számos egyszerűsítéssel) a 3.23. ábra szemlélteti.



3.23. ábra. Hőszolgáltató erőműegység tiszta kapcsolt energiatermelése (kp) és közvetlen (k) villamosenergia-termelése

Az ellátandó csúcs hőigény  $\dot{Q}_{cs}$ , az évi hőigény  $Q = \dot{Q}_{cs} \tau_{cs}$ , és  $\tau_{cs}$  az évi csúcskihasználási időtartam. A kapcsoltan termelt hőteljesítmény

$$\dot{Q}_{kp} = \delta \dot{Q}_{cs},$$

ahol  $\delta$  a kapcsolt hőtermelés kiépítési aránya. Az évente kapcsoltan termelt hő pedig

$$Q_{kp} = \delta Q = \dot{Q}_{kp} \tau_{kp},$$

ahol  $\delta$  az évente kapcsoltan kiadott hő aránya, és a kapcsolt energiatermelés évi kihasználási időtartama

$$\tau_{\text{kp}} = \frac{Q_{\text{kp}}}{\dot{Q}_{\text{kp}}} = \frac{\delta}{\delta} \tau_{\text{cs}} .$$

A kapcsolt villamos teljesítmény

$$P_{\text{kp}} = \sigma_{\text{kp}} \dot{Q}_{\text{kp}} ,$$

és az évente kapcsoltan termelt villamos energia

$$E_{\text{kp}} = \sigma_{\text{kp}} Q_{\text{kp}} = \sigma_{\text{kp}} \delta Q = \sigma_{\text{kp}} \delta q E = P_{\text{kp}} \tau_{\text{kp}} ,$$

ahol  $\sigma_{\text{kp}} = E_{\text{kp}} / Q_{\text{kp}}$  tiszta kapcsolt energiatermelésben a kapcsoltan termelt termékek aránya,  $\delta = Q_{\text{kp}} / Q$  a kapcsoltan termelt és az összes hő aránya,  $q = Q / E (= 1 / \sigma)$  az összes hő és az összes villamos energia aránya. Korszerű gázmotorok esetén  $\sigma_{\text{kp}} \approx 0,6-1$ , kombinált gáz/gőzerőművek esetén  $\sigma_{\text{kp}} \approx 1-1,4$  értékekkel számolhatunk.

A közvetlen (kondenzációs) évi villamosenergia-termelés lehetséges maximális értékét az ábra halványabban árnyékolt területe szemlélteti, ha az egység villamos teljesítménye kapcsolt és közvetlen energiatermelésnél ugyanaz ( $P_{\text{kp}} \approx P_k$ ), és  $\tau_o$  a blokk évi üzemideje. Az évente közvetlenül termelt villamos energia tényleges értéke

$$E_k = (P_{\text{kp}} \tau_o - E_{\text{kp}}) \nu_k = P_{\text{kp}} (\tau_o - \tau_{\text{kp}}) \nu_k ,$$

ha  $\nu_k$  a közvetlen villamosenergia-termelés lehetőségének kihasználási tényezője.

Az évente kapcsoltan termelt és az összes villamos energia aránya

$$x_{\text{kp}} = \frac{E_{\text{kp}}}{E} = \frac{E_{\text{kp}}}{E_{\text{kp}} + E_k} .$$

Az évi hőigényre vetített fajlagos évi villamosenergia-termelés

$$\sigma = \frac{1}{q} = \frac{E}{Q} = \frac{\delta \sigma_{\text{kp}}}{x_{\text{kp}}} .$$

Az évi villamosenergia-termelés átlaghatásfoka (feltételezve, hogy a hőtermelés hatásfoka  $\eta_{\text{kp}}$ )

$$\bar{\eta}_E = (1 - x_{\text{kp}}) \eta_k + x_{\text{kp}} \eta_{\text{kp}} .$$

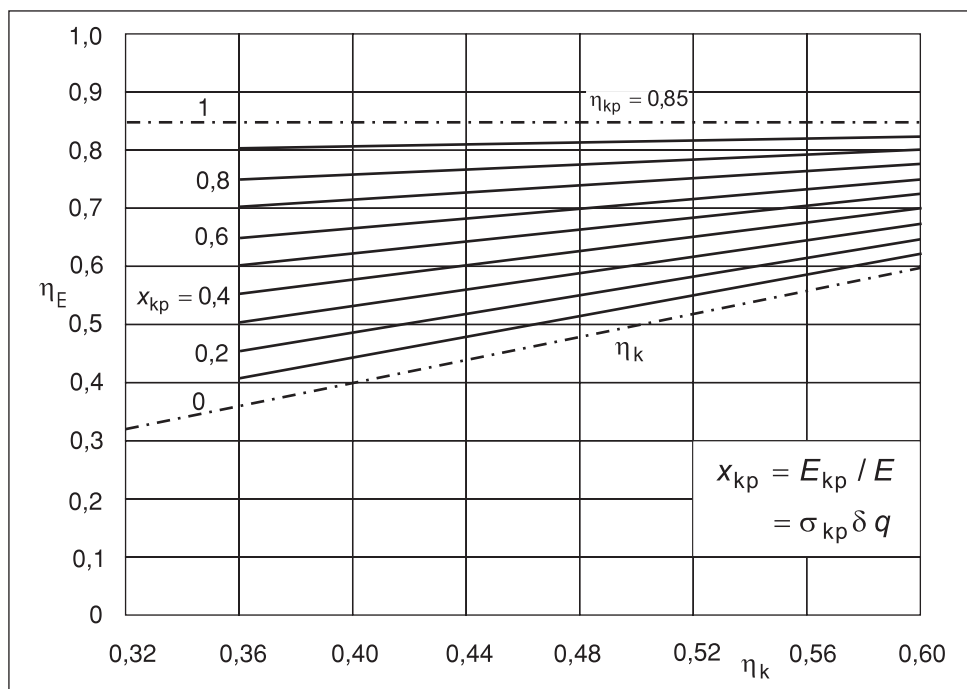
Az évi hő- és villamosenergia-termelés együttes hatásfoka

$$\eta_{Q+E} = \frac{Q+E}{G} = \frac{Q+E}{\frac{Q}{\eta_{\text{kp}}} + \frac{E}{\bar{\eta}_E}} = \frac{1+\sigma}{\frac{1}{\eta_{\text{kp}}} + \frac{\sigma}{\bar{\eta}_E}} > \bar{\eta}_E .$$

*Példák.* Határozzuk meg gázmotor ( $\eta_{kp} = 0,84, \mu_E = \eta_k = 0,36, \mu_Q = 0,48, \sigma_{kp} = 0,75$ ) és kombinált gáz/gőzerőmű ( $\eta_{kp} = 0,85, \mu_E = \eta_k = 0,48, \mu_Q = 0,37, \sigma_{kp} = 1,30$ ) esetén az előző energetikai jellemzőket, ha a távhőrendszer adatai:  $\delta = 0,5, \delta = 0,9, \tau_{cs} = 2600$  h/év,  $\tau_o = 8000$  h/év,  $\tau_{kp} = 4680$  h/év,  $v_k = 0,25, x_k = 0,85$ . A számítás eredményeit a 3.9. táblázat tartalmazza és a 3.24. ábra is feltünteti.

3.9. táblázat. Gázmotoros és gáz/gőzerőműves kapcsolt energiatermelés jellemzői

	Gázmotor	Gáz/gőzerőmű
Hőre vetített villamos energia, $\sigma$	0,784	1,376
	kWh/GJ	382
Villamosenergia-termelés átlaghatásfoka, $\bar{\eta}_E$	0,768	0,795
Hő- és villamosenergia-termelés hatásfoka, $\eta_{Q+E}$	0,807	0,817

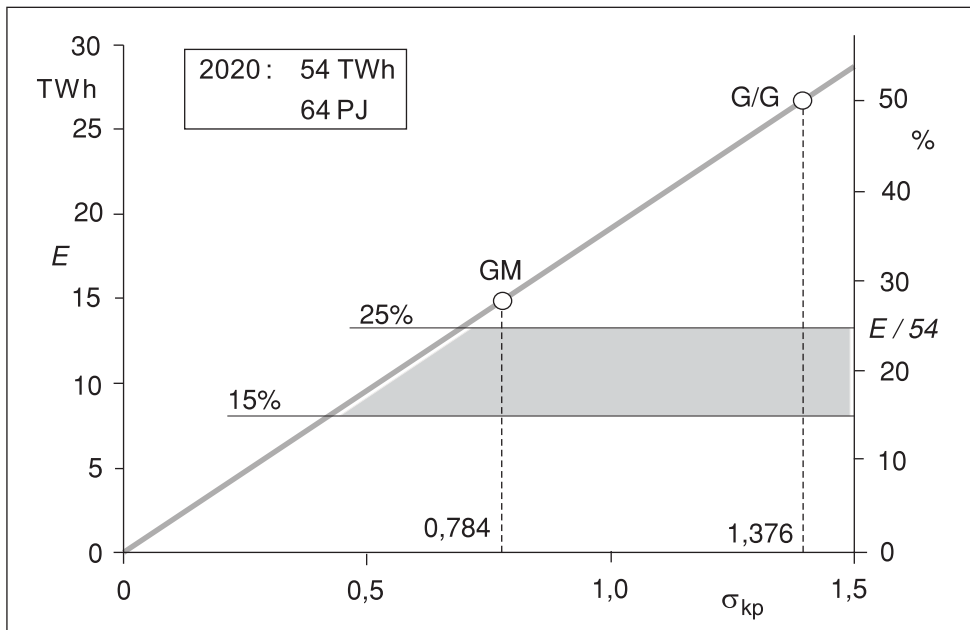


3.24. ábra. Közvetlen és tiszta kapcsolt villamosenergia-termelés átlaghatásfoka

A táblázat adatai alapján is megállapítható, hogy a *hatásfokok csak kis mértékben változnak*, a villamosenergia-termelés átlaghatásfoka mindig kisebb a hő- és villamosenergia-termelés együttes hatásfokánál, de különbségük a korszerűbb kapcsolt energiatermelő erőművekben csökken. A megítélés lényege, hogy *korszerűbb erőműben a kapcsoltan termelt villamos energia a több!*

A kapcsolt energiatermelés villamosenergia-termelését szemléltessük a 2020-ban elképzelt villamosenergia-rendszerben, amikor a feltételezett hasznos hőigény 64 PJ,

a villamosenergia-igény 54 TWh. A 3.25. ábra mutatja, hogy az adott hasznos hőigény bázisán mennyi villamos energiát lehet termelni a kapcsolt energiatermelés  $\sigma_{kp}$  mutatója függvényében, és az milyen részarányát képezi az összes villamosenergia-igénynek.



3.25. ábra. A hasznos hőigény bázisán termelhető villamos energia 2020-ban

A 3.25. ábra kapcsán a kapcsoltan termelhető villamos energia mennyiségére és korlátjaira több megállapítás tehető:

- legkorszerűbb megoldásokkal a kapcsoltan termelhető villamos energia aránya elérheti akár az összigeny 50%-át is, az átlagszint természetesen csak kisebb részarányt eredményezhet,
- a fosszilis energiahordozókból termelt villamos energia (ez 2020-ban 31 TWh körüli) a legkorszerűbb megoldások esetén teljesen kapcsolt is lehetne,
- földgáz-tüzelésű erőműveknél ezek a szempontok és korlátok még fokozottabban érvényesülnek,
- a hasznos hőigény nagyságának meghatározó szerepe nyilvánvaló, és részletes elemzést igényel az, hogy az ellátott hő eddig csökkenő tendenciája ellenére a jövőben mekkora növekedése várható.

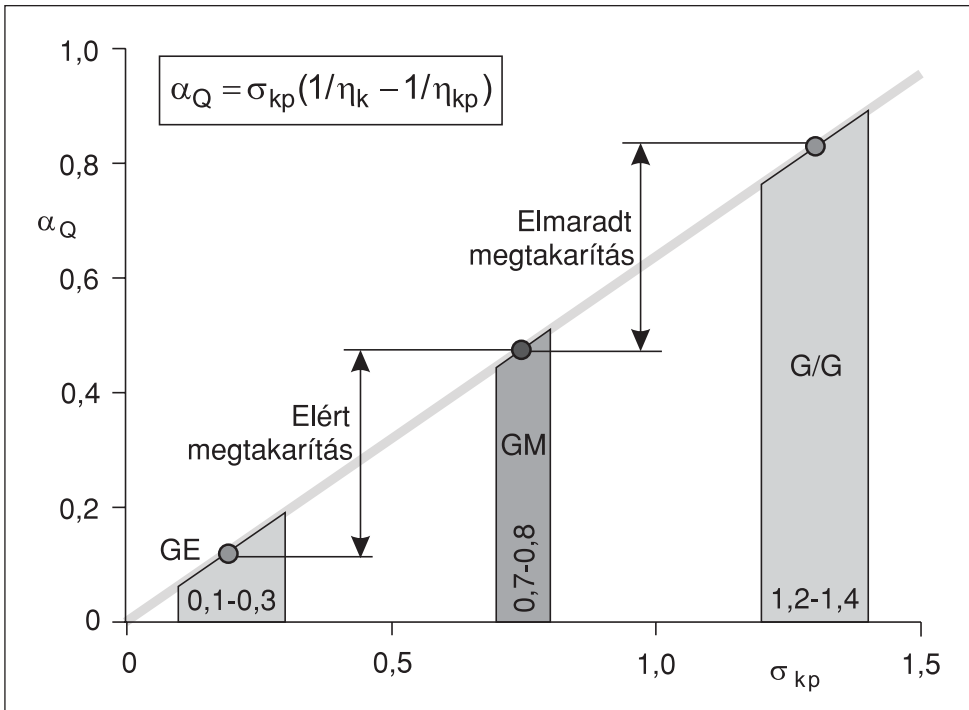
### 3.5.3. Kapcsolt energiatermelés és a primerenergia-megtakarítás

A 3.9. táblázat kapcsán hangsúlyoztuk, hogy a kapcsolt energiatermelés korszerűsége a villamos hatásfokokat gyakorlatilag alig befolyásolja. A haszon a villamosenergia-termelés, és az ezzel arányos primerenergia-megtakarítás növekedésében jelentkezik.

A kapcsolt energiatermeléssel elérhető, a termelt hőre vetített fajlagos primerenergia-megtakarítás (ha a közvetlen hőtermelés és a kapcsolt energiatermelés hatásfoka megegyezik,  $\eta_{FM} = \eta_{KE}$ )

$$\alpha_Q = \frac{G_{\text{meg}}}{Q} = \sigma_{kp} \left( \frac{1}{\eta_k} - \frac{1}{\eta_{kp}} \right),$$

aminek változását a  $\sigma_{kp}$  függvényében a 3.26. ábra mutatja, ha  $\eta_k = 0,55$  és  $\eta_{kp} = 0,85$ .



3.26. ábra. A fajlagos primerenergia-megtakarítás a kapcsolt energiaarány függvényében, az elért és az elmaradt megtakarítás

A 3.26. ábra három kapcsolt energiatermelést emel ki: a meglévő elavult rendszert GE, az elérhető legkedvezőbb lehetőséget G/G és a megvalósított megoldást GM jelképezze (az utóbbi a félig lévő pohár). A megvalósított megoldás a meglévő rendszerhez képest kedvező, számottevő az elért fajlagos primerenergia-megtakarítás (félig tele pohár). De megvalósíthattuk volna a legkedvezőbb lehetőséget is, ehhez képest nagy az elmaradt fajlagos primerenergia-megtakarítás (félig üres pohár).

Az elmúlt évek hazai kapcsolt energiatermelésének fejlesztését a félig lévő pohárhoz hasonlíthatjuk és megállapíthatjuk: *a kapcsolt energiatermelés fejlesztése érdekében sokat tettünk, de nem eleget!*

Hogy az adott esetben mi a legkedvezőbb megoldás, azt a hasznos hőigény nagysága befolyásolja. A nagyteljesítményű, *koncentrált* távhőrendszerekben a kombinált gáz/gőzerőművek, a kisteljesítményű, *decentralizált* energiatermelésben viszont a gázmotorok tekinthetők kedvezőnek. A megoldáson belül fontosak a jellemzők is, elsősorban a  $\sigma_{kp}$  értéke.

### 3.5.4. Kapcsolt energiatermelés és a széndioxid kibocsátás

A kapcsolt energiatermelés célja a primerenergia-megtakarítás mellett a széndioxid kibocsátás csökkentése. A primerenergia-megtakarítás és a széndioxid kibocsátás közötti kapcsolatot lényegesen befolyásolja a felhasznált tüzelőanyag.

Ha a közvetlen és a kapcsolt energiatermelésben ugyanazt a tüzelőanyagot használjuk, amelynél a széndioxid keletkezési tényező  $s_{CO_2}$ , akkor a kapcsoltan termelt hőre vetített fajlagos széndioxid csökkenés

$$\frac{\Delta I_{CO_2}}{Q} = \alpha_Q s_{CO_2} \cong \sigma \left( \frac{1}{\eta_{KE}} - \frac{1}{\eta_G} \right) s_{CO_2}$$

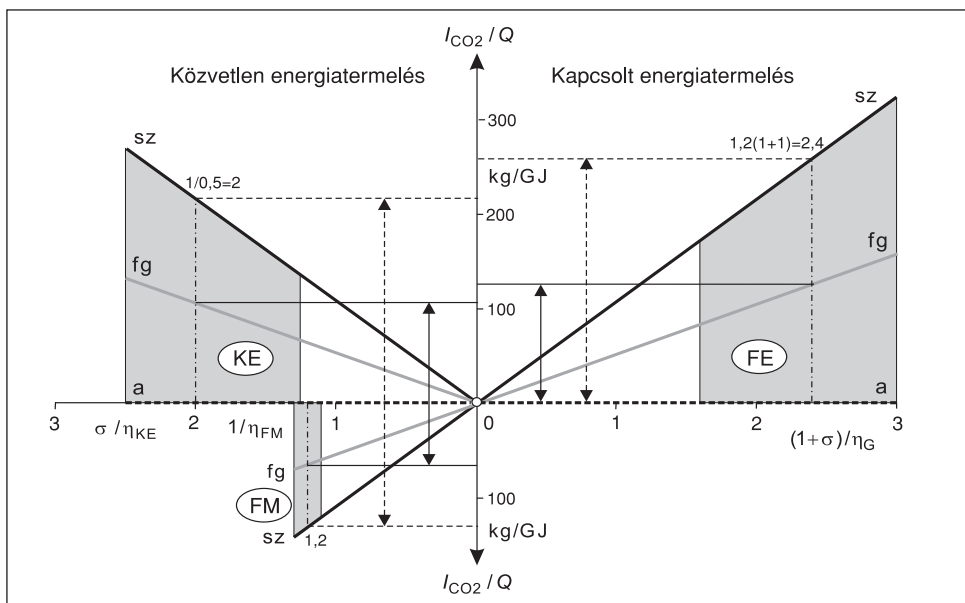
arányos az  $\alpha_Q$  fajlagos primerenergia-megtakarítással. Az összefüggésben KE-index kondenzációs erőműre, G-index a fűtőerőmű primerenergia-felhasználására utal.

Bonyolultabb a helyzet, ha a felhasznált primerenergia, és a fajlagos széndioxid keletkezési tényező eltérő: a közvetlen hőtermelésnél  $s_{CO_2FM}$  (FM-index a fűtőművet jelöli), a közvetlen villamosenergia-termelésnél  $s_{CO_2KE}$  és a kapcsolt energiatermelésnél  $s_{CO_2}$ . Ebben az esetben a kapcsolt energiatermeléssel elérhető, szintén a kapcsoltan termelt hőre vonatkoztatott fajlagos csökkenés

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_{CO_2}}{Q} &= \left( \frac{s_{CO_2 FM}}{\eta_{FM}} + \frac{\sigma s_{CO_2 KE}}{\eta_{KE}} \right) - \frac{(1 + \sigma) s_{CO_2}}{\eta_G} \\ &= \left( \frac{s_{CO_2 FM}}{\eta_{FM}} + \frac{\sigma s_{CO_2 KE}}{\eta_{KE}} \right) - \frac{s_{CO_2}}{\mu_Q} \end{aligned}$$

Ezeknek az összefüggéseknek a felhasználásával a 3.27. ábra szemlélteti a közvetlen (FM+KE) és a kapcsolt energiatermelés esetén kibocsátott széndioxid meghatározásának módszerét különböző primerenergiák [a atomenergia/vízenergia/megújuló ( $s_{CO_2} = 0$ ), fg földgáz ( $s_{CO_2} = 55$  g/MJ), sz szén ( $s_{CO_2} = 110$  g/MJ)] esetén. A folytonos vonalakkal jelölt értékek egységesen földgáztüzelésre, a szaggatott vonalakkal jelzett értékek egységesen szénfelhasználásra vonatkoznak, de tetszés szerinti kombinációk kibocsátásai is meghatározhatók.

A széndioxid kibocsátás szempontjából a kapcsolt energiatermelés különösen kedvező akkor, ha az összehasonlítás alapjául szolgáló rendszerben a fűtőegység földgáztüzelésű, a villamos energiát pedig közvetlenül szén-erőmű termeli. Kedvezőtlen viszont akkor, ha az érintett villamos energiát közvetlenül atomerőműben, vízerőműben vagy megújuló energiákból állítjuk elő.



3.27. ábra. Széndioxid kibocsátás egyenértékű közvetlen és kapcsolt energiatermelés esetén különböző tüzelőanyagoknál

### 3.5.5. Kapcsolt energiatermelés és a villamos menetrendtartás

A kötött menetrendű kapcsolt energiatermelés növelése nehézséget okoz az erőműrendszer menetrendtartásában. A nehézségek feloldása két úton lehetséges: vagy az erőműrendszert bővítjük rugalmas üzemű egységekkel (pl. szivattyús tározós vízerőművel), vagy a fűtőerőműben gondoskodunk a villamos teljesítmény kívánt, a fogyasztói igényeknek megfelelő rendelkezésre állásáról és változtatásáról.

A kapcsolt energiatermelő egységek villamos teljesítményének rugalmas változtatási lehetőségeit a 3.28. ábra foglalja össze.

A hőszolgáltató gáz/gőzerőművek és gázmotorok esetén a lehetőségek termelői és hőtárolási oldalról a következők:

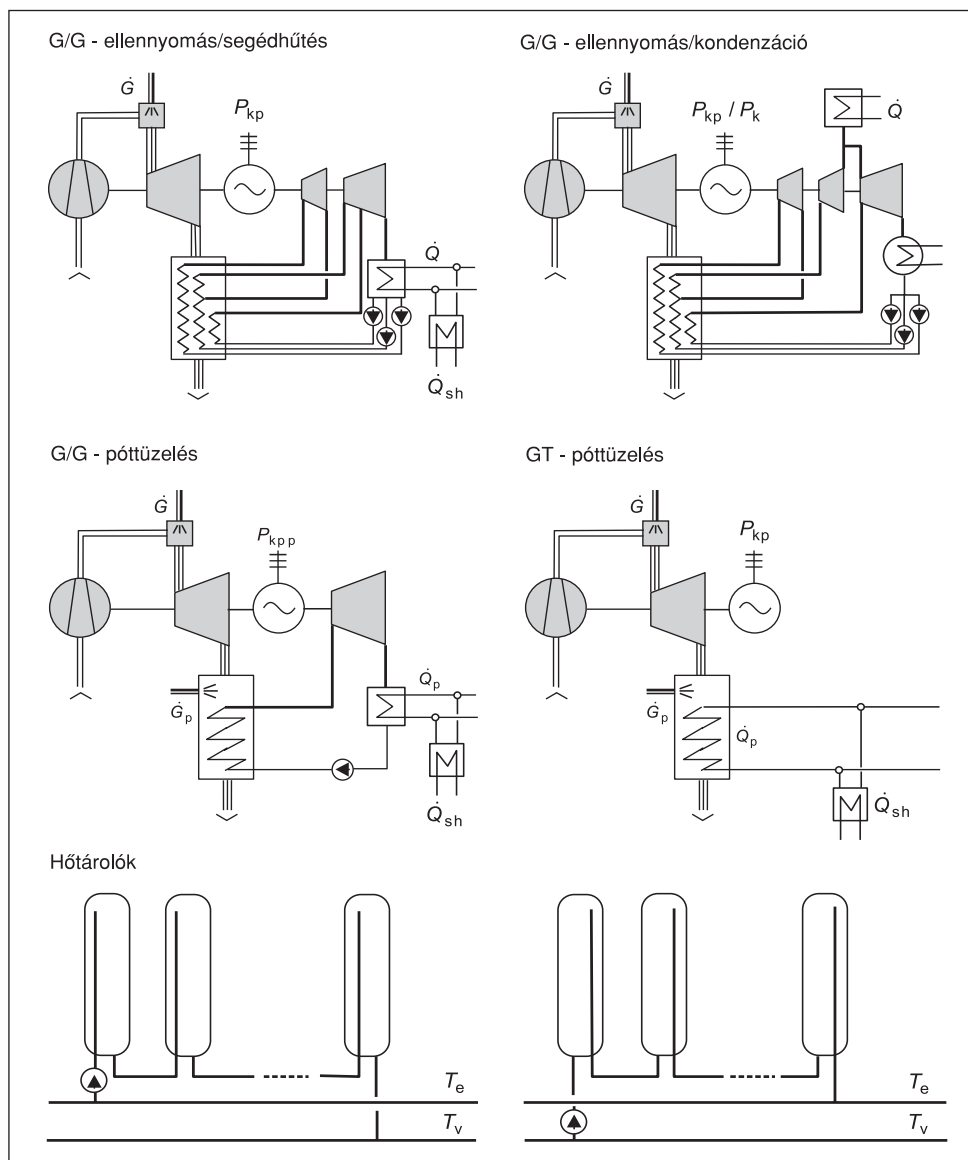
- A fűtőblokk hőkiadása lehet ellennyomású vagy megcsapolásos-kondenzációs rendszerű. A villamos teljesítmény mindenkori rugalmas rendelkezésre állását előbbi esetben a *segédhűtés*, a második esetben maga a *megcsapolásos-kondenzációs* rendszer biztosítja. Ezek a lehetőségek gőzerőművekben és kombinált gáz/gőz-erőművekben egyaránt megvalósíthatók.
- A *póttüzelés* mind a fűtőgázturbinák, mind a hőszolgáltató gáz/gőzerőművek rugalmas üzemét képes biztosítani. Gáz/gőzerőművek esetén a póttüzelés is hatékony kapcsolt energiatermelést eredményezhet.
- A korábban szorgalmazott *rugalmas üzem* (csúcsrajartás) révén elsősorban a gőzközegű fűtőerőművek villamos teljesítményének jobb értékelhetőségét kívánták elérni. Jelenlegi gázközegű egységeknél a rugalmas üzemnek lényegesen jobbak a lehetőségei, és céljai is többoldalúak.



- A *hőtárolás*, elsősorban a forróvíz-tárolás és nem túl nagy teljesítmények mellett, egyszerű módon nyújt lehetőséget a hőtermelés és a villamos teljesítmény egymástól független napi változtatására.

A rugalmas üzemvitelt nyújtó megoldással több új hőszolgáltató erőműben már találkozhatunk. Szélesebb körű, vagy általános alkalmazásukról viszont még nem beszélhetünk.

A villamosenergia-piac viszonyai is ösztönzik a hőszolgáltató erőművek rugalmas üzemét, ha a villamosenergia-árak kellően tükrözik a menetrendtartás követelményeit.



3.28. ábra. A kapcsolt energiatermelés rugalmas villamos menetrendjét biztosító erőművi és hőtárolós megoldásai

### 3.6. **Primerenergia-megtakarítás és széndioxid csökkenés fosszilis erőművekben**

A fosszilis erőművek fejlesztésének jelenleg alapkérdése a primerenergia-felhasználás és a széndioxid kibocsátás csökkentése. Ennek egyes lehetőségeiről (hatásfokjavítás, kapcsolt energiatermelés) már tettünk említést, de indokolt a szóba jövő lehetőségekről többé-kevésbé átfogó, közös nevezőre hozást biztosító összehasonlító képet is nyújtani [1, 56].

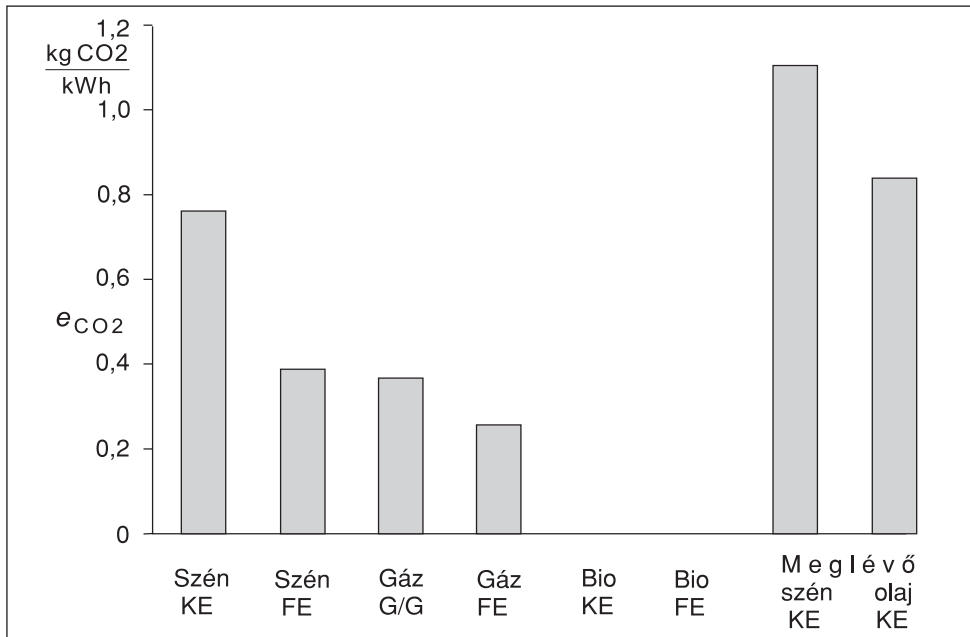
A széndioxid csökkentésnek számos lehetősége van. Erőművekben szóba jövő lehetőségek: az energiaigényesség javítása ( $\varepsilon$ ), a hatásfokjavítás ( $\eta$ ), a tüzelőanyag-váltás ( $s_{CO_2}$ ), a kapcsolt energiatermelés ( $\sigma$ ), a megújuló energiák hasznosítása ( $\hat{u}$ ). Az egyes eljárásokkal elérhető primerenergia-megtakarítás és széndioxid csökkenés összefüggéseit a 3.10. táblázat foglalja össze (r a régi, j a javított megoldást jelöli). A közös alap kizárja a szubjektivitást az összehasonlításból és az értékelésből. A *cel* nem önmagában az energiaigényesség csökkentése, a hatásfokjavítás, a kapcsolt energiatermelés vagy a megújuló energiák használata, ezek csak *eszközök*, hanem az, hogy minél kevesebb primerenergiát használjunk fel és minél kevesebb széndioxidot bocsássunk ki.

3.10. táblázat. Primerenergia-megtakarítás és széndioxid csökkentés erőművi lehetőségei

	Primerenergia-megtakarítás $\Delta G$	Széndioxid csökkenés $\Delta I_{CO_2}$
Energiaigényesség csökkentése	$\frac{(\varepsilon_{Er} - \varepsilon_{Ej})N}{\eta_E}$	$\frac{(\varepsilon_{Er} - \varepsilon_{Ej})N}{\eta_E} s_{CO_2}$
Hatásfokjavítás	$E \left( \frac{1}{\eta_{Er}} - \frac{1}{\eta_{Ej}} \right)$	$E \left( \frac{1}{\eta_{Er}} - \frac{1}{\eta_{Ej}} \right) s_{CO_2}$
Tüzelőanyag-váltás	$E \left( \frac{1}{\eta_{Er}} - \frac{1}{\eta_{Ej}} \right)$	$E \left( \frac{s_{CO_2 r}}{\eta_{Er}} - \frac{s_{CO_2 j}}{\eta_{Ej}} \right)$
Kapcsolt energiatermelés	$Q\sigma \left( \frac{1}{\eta_{KE}} - \frac{1}{\eta_G} \right)$	$Q\sigma \left( \frac{1}{\eta_{KE}} - \frac{1}{\eta_G} \right) s_{CO_2}$
Megújuló energiák hasznosítása	$\frac{E_{\hat{u}}}{\eta_{ER}}$	$\frac{E_{\hat{u}}}{\eta_{ER}} s_{CO_2 R}$

A különböző típusú erőművek fajlagos széndioxid kibocsátása nagyon eltérő, és ebből más-más széndioxid csökkentési lehetőségek adódnak. A 3.28. ábra az erőművek fajlagos széndioxid kibocsátását szén, gáz, olaj és biomassza tüzelőanyagok esetén, közvetlen és kapcsolt energiatermelésnél, illetve meglévő és új erőművekben mutatja [57]. Az ábra adataiból a kisebb széndioxid kibocsátást jelentő sorrendek a következők: szén-olaj-gáz-biomassza, közvetlen-kapcsolt energiatermelés, meglévő-új erőmű.

A széndioxid csökkentés általában primerenergia-megtakarítással párosul, azzal érhető el. A különböző módokon elért primerenergia-megtakarításokat – a széndioxid csökkentéstől függetlenül is – lehet gazdaságilag értékelni.



3.28. ábra. Különböző tüzelőanyagú, közvetlen és kapcsolt, meglévő és új erőművek fajlagos széndioxid kibocsátása

Az energiamegtakarítás csökkenti a primerenergia-felhasználás költségét. Ha a primerenergia hőára  $p_G$ , akkor az évi  $\Delta G = \dot{G}\tau$  primerenergia-megtakarítás

$$\Delta C_G = \Delta G p_G = \dot{G}\tau p_G$$

évi primerenergia-költségcsökkenést eredményez, ahol  $\dot{G}$  a primerenergia-megtakarítás teljesítménye,  $\tau$  ennek évi kihasználási időtartama. A primerenergia-megtakarítás különböző tüzelőanyagokban jelentkezhet, s ezek hőára eltérő lehet.

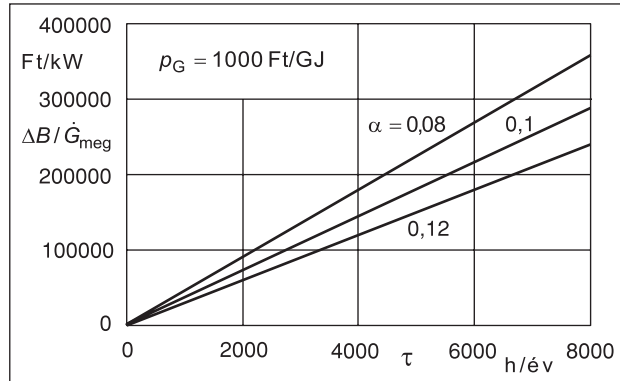
Az éves primerenergia-költségcsökkenés számottevő beruházási költségnövelést tesz lehetővé. Ha az annuitási tényező  $\alpha$ , akkor (a legegyszerűbb gazdasági számítás szerint) az éves primerenergia-csökkenés, illetve -költségcsökkenés

$$\Delta B = \dot{G}\Delta b = \frac{\Delta C_G}{\alpha} = \frac{\dot{G}\tau p_G}{\alpha}$$

beruházási költségnövelést enged meg. A megengedhető fajlagos beruházási költség pedig

$$\Delta b = \frac{\Delta B}{\dot{G}} = \frac{\Delta C_G}{\alpha \dot{G}} = \frac{\tau}{\alpha} p_G \cdot$$

Az összefüggés alapot nyújt a különböző energiamegtakarítások gazdasági értékeléséhez, piaci hitelezéséhez, illetve az állami energiaracionalizálási programok meghirdetéséhez. A fajlagos beruházási költségnövekedést érzékenyen befolyásolja az évi kihasználási időtartam, a kis kihasználhatóság a gazdaságosságot rontja, viszont a nagy kihasználás igen jelentős többletberuházást enged meg (3.29. ábra).



3.29. ábra. Energiamegtakarítás érdekében megengedhető beruházási többletköltség

A széndioxid kibocsátás csökkentése a társadalom érdeke, ezért indokolt állami támogatása. Az állami támogatást mérsékli, hogy a széndioxid kibocsátás általában energia- és költségmegtakarítással jár, tehát az energiaszolgáltató is érdekelt a széndioxid kibocsátást csökkentő beruházások megvalósításában.

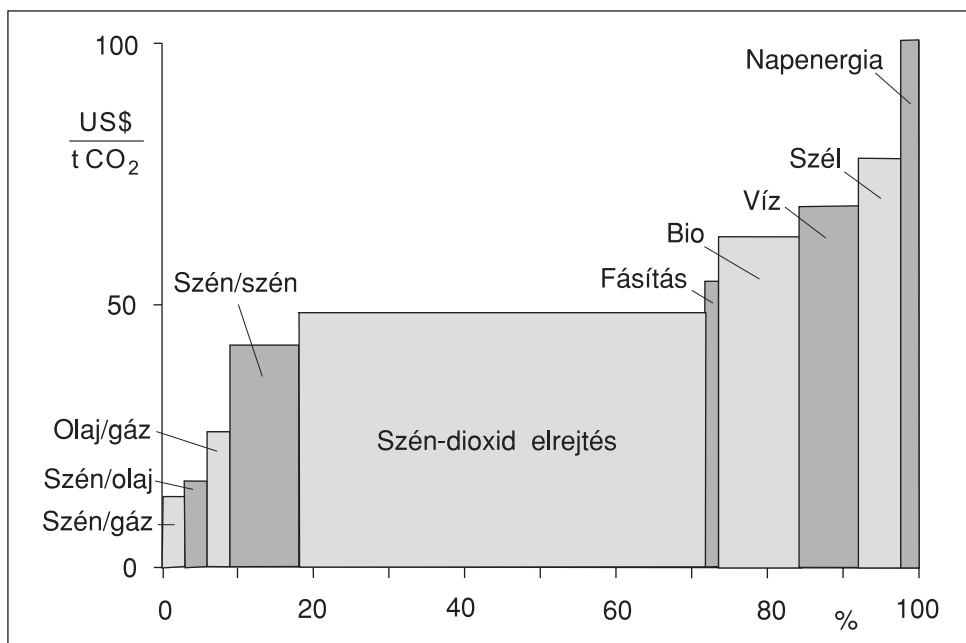
Az állami támogatáshoz az évi  $\Delta I_{CO_2}$  széndioxid kibocsátás csökkentése jelentheti a közös alapot. Az indokolt támogatás

$$\Delta T_{CO_2} = \Delta I_{CO_2} \cdot t_{CO_2} ,$$

ahol  $t_{CO_2}$  a széndioxid kibocsátás egységnyi csökkentésére vonatkozó állami támogatás.

Az állami támogatás értékére még nincs kialakult gyakorlat, csak néhány megfontolásra támaszkodó adat áll rendelkezésre. Például a kapcsolt energiatermelésre vonatkozó EU direktíva  $t_{CO_2} = 10 \text{ €}/t$  (~2500 Ft/t) támogatást jelez. Ezt a fajlagos támogatást érzékeltesse egy példa. A példában legyen  $\rho_G = 1000 \text{ Ft}/\text{GJ}$  a földgáz ára, amelynek eltüzelése során  $s_{CO_2} = 55 \text{ kg}/\text{GJ}$  széndioxid keletkezik. Ezekkel a fajlagos klímátámogatás  $\Delta T_{CO_2} = 55 \cdot 10^{-3} \cdot 2500 = 137,5 \text{ Ft}/\text{GJ}$ , amely a földgáz árához képest mintegy 14%-ot képvisel.

A széndioxid csökkentés fajlagos költségét számos vizsgálat 10–100 US\$/t-ra becsüli. Ezt a becslést alapozza meg a 3.30. ábra, amely a lehetséges széndioxid csökkentési eljárások függvényében mutatja a fajlagos költségek alakulását. A széndioxid csökkentés legkisebb költségét a meglévő erőművek átalakítása eredményezi, legkedvezőbb a szénerőmű átállítása földgázra vagy olajra (10–20 US\$/t), ezt követi az olajerőmű átállítása földgázra (25 US\$/t), majd a meglévő szénerőmű helyett korszerű szénerőmű létesítése (40 US\$/t). Ezek az átalakítások az erőművekből kibocsátott összes széndioxidnak 15–20%-át csökkenthetik. Drágább megoldást jelent a fásítás és a biomassza felhasználása (55–65 US\$/t), a víz- és szélerőművek (70–80 US\$/t) és legdrágábbak a naperőművek (100 US\$/t). A megújuló energiahasznosítással az erőművi széndioxid kibocsátás 25–30%-át lehet csökkenteni. E becslés alapján a meglévő erőművek átalakítása és a megújuló energiák hasznosítása együtt az erőművi széndioxid összkibocsátásnak nem egészen felét képes csökkenteni a megjelölt költségszinten.



3.30. ábra. A széndioxid kibocsátás csökkentésének költségei és potenciálja

### 3.7. Egy forgatókönyv: a fosszilis erőművek lehetséges szerepe 2020-ban

Az erőművek fejlesztése időszerű, erre számos forgatókönyv készül. A fosszilis erőművek egy lehetséges szerepét: teljesítőképességét, energiatermelését és a beépített teljesítőképességre vonatkoztatott évi kihasználási időtartamát a 3.11. táblázat mutatja be.

3.11. táblázat. Fosszilis erőművek lehetséges kihasználása 2020-ban

	Beépített teljesítőképesség MW	Villamosenergia-termelés TWh	Beépített teljesítőképesség kihasználási időtartama h/év
Összes	9600	54	5625
– atomerőmű	1900	14	7368
– import	1000	6	6000
– megújuló	400	3	7500
Fosszilis	6300	31	4921
– szén	1800	8	4444
– szénhidrogén/kond.	2400	10	4167
– szénhidrogén/kapcs.	2100	13	6190

A táblázat szerint a fosszilis erőművek évi kihasználási időtartama kisebb, mint a rendszer összes erőművéé. A táblázat arányai esetén a fosszilis erőművek primerenergia-felhasználását és széndioxid kibocsátását a 3.12., illetve a 3.13. táblázat szemlélteti, a feltételezett hatásfokok figyelembevételével.

3.12. táblázat. A fosszilis erőművek lehetséges villamosenergia- és hőtermelése és primerenergia-felhasználása 2002. és 2020. években

	2002				2020			
	Villamos energia TWh	Hő PJ	Hatásfok %	Primerenergia PJ	Villamos energia TWh	Hő PJ	Hatásfok %	Primerenergia PJ
Szén	8,5		28	109	8		42	69
Szénhidrogén	5,5		36	55	10		56	64
– kapcsolt	5	45	75	84	13	64	85	130
– összes				139				194
Fosszilis	19	45		248	31	64		263

3.13. táblázat. A fosszilis erőművek lehetséges primerenergia-felhasználása és széndioxid kibocsátása 2002. és 2020. években

	2002		2020	
	Primerenergia PJ	Széndioxid millió t	Primerenergia PJ	Széndioxid millió t
Szén	109	12,0	69	7,6
Szénhidrogén	139	7,6	194	10,7
Összes	248	19,6	263	18,3

A két utóbbi táblázat tükrözi a hatásfokjavítás és a tüzelőanyag-struktúra szerepét a primerenergia-felhasználásban és a széndioxid kibocsátásban. Noha feltételezés szerint a vizsgált időszakban a villamosenergia-termelés 63%-kal, a hőtermelés 42%-kal nő, a primerenergia-felhasználás növekedése csak mintegy 6%, ezen belül a szénhidrogén-felhasználás növekedése viszont 40%. A széndioxid kibocsátás pedig valamelyest csökkenhet is.

- 1 *Büki G.*: Erőművek. Műegyetemi Kiadó Budapest, 2004.
- 2 *GKI Energiakutató és Tanácsadó Kft.*: Az új energiakoncepció alapkérdései. 2003.
- 3 *Büki G.*: Energiaátalakítás, gáz- és gőzerőművek. Akadémiai Kiadó Budapest, 2000.
- 4 *US DOE*: Clean coal technology. The new coal era. 1991.
- 5 *Reményi K.*: Új technológiák az energetikában. Akadémiai Kiadó Budapest, 1995.
- 6 *Touchton, G. L.*: EPRI improved coal-fired power plant project. First EPRI International Conference, Palo Alto, 1986.
- 7 *Nakabayashi, Y. et al.*: Japanese development in high temperature steam cycles. COST Conference, Liege, 1990.
- 8 *Scarlin, R. B. et al.*: State of european COST. activities. Second EPRI International Conference, Palo Alto, 1988.
- 9 *Hourfar, D. et al.*: Neue Dampfparameter für fortschrittliche Steinkohlekraftwerke. VGB Kraftwerkstechnik, 1997/6.
- 10 *Effenberger, H.*: Dampferzeuger und Feurungen. BWK, 1996/4.
- 11 *Rozgonyi P.*: Széntüzelésű kazánok fejlesztése. Magyar Energetika, 1995/3.
- 12 *Farwick, H. et al.*: SCR-Katalysatoren. VGB Kraftwerkstechnik, 1993/5.
- 13 *Berger, S. et al.*: Mechanisch-technische Entwässerung von Braunkohle. VGB KraftwerksTechnik, 1997/5.
- 14 *Büki G.*: Hatásfokjavítás szénszárítással és füstgázhő-hasznosítással. Magyar Energetika, 1994/4.
- 15 *Heitmüller, R. J. et al.*: Wärme- und feuerungstechnisches Konzept des Dampferzeugers für den BOA-Block Niederaußem K. VGB KraftwerksTechnik, 1999/5.
- 16 *Kotschenreuther, H.*: Advanced coal-fired power plants exploit high temperature technology . MPS, 1994/10.
- 17 *Bendich, W. et al.*: Eigenschaften der 9- bis 12%-Chromstähle und ihr Verhalten unter Zeitstandbeanspruchung. VGB Kraftwerkstechnik, 1993/1.
- 18 *Blum, R. et al.*: Neuentwicklungen hochwarmfester ferritisch-martensitischer Stähle aus den USA, Japan und Europa. VGB Kraftwerkstechnik, 1994/8.
- 19 *Büki G.*: Korszerű erőművek szerkezeti anyagai. Magyar Energetika, 1984/4.
- 20 *Strauß, K.*: Kraftwerkstechnik. Springer-Verlag Berlin, 1992.
- 21 *Heimermann, G. et al.*: Dampferzeuger für fortgeschrittene Dampfparameter. VGB Kraftwerkstechnik, 1993/8.
- 22 *Almheam, P. et al.*: Cottbus opts PFBC repowering. MPS.
- 23 *Beér, J. M. et al.*: A coal-fueled combustion turbine cogeneration system with topping combustion. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997/1.

- 24 *Bergmann, H. et al.*: Entwicklungstand von Kombi-Kraftwerken auf Kohlebasis. VGB Kraftwerkstechnik, 1995/2.
- 25 *Büki G.*: Szénbázisú kombinált gáz/gőzerőművek. Magyar Energetika, 1991/1.
- 26 *Hannes, K. W.*: Kohle-Kombi-Kraftwerke mit Druckkohlenstaubfeuerung: Das Druckflamm-Forschungsprogramm. VGB PowerTech, 2002/8.
- 27 *Yan, X. L. et al.*: Dual Brayton cycle gas turbine pressurized fluidized bed combustion power plant concept. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998/2.
- 28 *Thelen, F.*: Gas-/Dampfturbinenprozesse für feste Brennstoffe mit Druckwirbelschichtenfeuerung. VGB Kraftwerkstechnik, 1993/8.
- 29 *Pruschek, R. et al.*: Kohlekraftwerke der Zukunft. BWK, 1997/11-12.
- 30 *Bozsikné Gál I.*: Környezetvédelmi fejlesztések a Mátrai Erőműben 1998–2001. években. Magyar Energetika, 2000/2.
- 31 *Bozsikné Gál I. et al.*: Ligniterőmű a piacnyitás küszöbén – megújulás, környezetvédelem, jövőkép, piac. Magyar Energetika, 2002/5.
- 32 *Büki G.*: Gázturbinák a gőzerőművek megújításában. Magyar Energetika, 2002/3.
- 33 *Kuhl T. et al.*: Dunamenti, a privatizált erőmű. Magyar Energetika, 2003/1.
- 34 *Stróbl A.*: A villamosenergia-rendszer forrásoldalának teljesítőképességéről – lehetőségek és remények. A Magyar Villamos Művek Közleményei, 2004/1.
- 35 First 240 MW GT26 gas turbine to power Rheinhafen Unit 4 upgrade. MPS, 1995/8.
- 37 *Büki G.*: Gáz/gőzközegű erőművek alkalmazásának világhelyzete, a hazai alkalmazás lehetőségei. Energia és Atomtechnika, 1986/10.
- 38 *Franke, U.*: Der HAT-Prozess (im Vergleich mit konkurrierenden Verfahren). BWK, 1996/11-12.
- 39 *Fruttschi, H. U.*: Gas turbines with sequential combustion for cogeneration of heat and power. ABB Review, 1995/3.
- 40 *Heck, K. A. et al.*: INCONEL alloy 783: An oxidation-resistant, low expansion superalloy for gas turbine applications. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998/2.
- 41 *Ito, K. et al.*: Effect of steam-injected gas turbines on the unit sizing of a cogeneration plant. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1997/1.
- 42 *Perkavec, M.*: Entwicklungstendenzen im Gasturbinenbau. BWK, 1998/4.
- 43 *Southall, I. et al.*: New 200 MW class 501G combustion turbine. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996/3.
- 44 *Dörr, H.*: Die neue Generation der leistungsstarken Gasturbinen für den Einsatz in GuD/Kombi-Kraftwerken in Einwellenanordnung. BWK, 1996/1-2.
- 45 *MKET*: Kapcsolt energiatermelés Magyarországon. Országtanulmány, 2003.
- 46 *Dezső Gy.*: A gázmotorok rendszerbe illesztésének időszerű kérdése. Magyar Energetika, 2003/2.



- 47 *Sztankó K. et al.*: Capstone C30 mikro-gázturbina alkalmazása a decentralizált energiatermelésben. Magyar Energetika, 2004/1.
- 48 *Kabs, H.*: Tubular SOFC – the way to commercialisation. VGB PowerTech, 2002/4.
- 49 *Dinter, F. et al.*: CHP with fuel cells models for the future supply of private and industrialcustomers. VGB PowerTech, 2001/12.
- 50 *Langnickel, U.*: Nutzung biogener Gase zur decentralen Strom- und Wärmeerzeugung in Brennstoffzellen. VGB PowerTech, 2001/12.
- 51 *Bohn, D. E.*: State of the art and potential of mikro gas turbines in combination with high-temperature fuel cells. VGB PowerTech, 2002/3.
- 52 *Loughhead, J.*: New technologies for decentralised generation. VGB PowerTech, 2002/3.
- 53 *Imre L. et al.*: Megújuló energiaforrások. Felsőfokú oktatási segédlet, 2000.
- 54 Az Európa Parlament és Európa Tanács 2004/8/EC sz. direktívája a hasznos hőigény alapú kapcsolt energiatermelés belső energiapiacra történő előmozdításáról, 2004.02.11.
- 55 *Büki G.*: Energetika. Műegyetemi Kiadó Budapest, 1997.
- 56 *Büki G.*: Az energiamegtakarítás lehetőségei, értékelése és támogatása. Magyar Energetika, 2002/5.
- 57 *Strömberg, L.*: Discussion on the potential and cost of different CO<sub>2</sub> emission control options in Europe. VGB PowerTech, 2001/10.

# Tartalom

<b>Bevezetés</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1 A fosszilis erőművek várható szerepe Magyarországon</b> .....	<b>4</b>
<b>3.2 Szénerőművek</b> .....	<b>6</b>
3.2.1 A meglévő szénerőművek sorsa .....	6
3.2.2 Új szénerőmű megoldások .....	7
3.2.3 Hazai szénerőmű-építési lehetőségek .....	12
3.2.4 Szénerőművek telepítése és környezeti hatásai .....	13
<b>3.3 Kondenzációs szénhidrogén nagyerőművek</b> .....	<b>14</b>
3.3.1 A 215 MW-os gőzblokkok gázturbinás korszerűsítése .....	14
3.3.2 Új kombinált gáz/gőzerőművek .....	16
3.3.3 A kondenzációs szénhidrogén erőművek hazai szerepe .....	18
<b>3.4 Decentralizált fosszilis erőművek</b> .....	<b>19</b>
3.4.1 Dugattyús gépek, gázmotorok .....	19
3.4.2 Mikrogázturbinák .....	21
3.4.3 Tüzelőanyag-cellák .....	23
3.4.4 Decentralizált energiatermelés és a hidrogénenergetika .....	30
<b>3.5 Kapcsolt energiatermelő szénhidrogén erőművek</b> .....	<b>30</b>
3.5.1 A kapcsolt energiatermelés mutatói .....	31
3.5.2 Kapcsolt energiatermelés a villamosenergia-rendszerben .....	34
3.5.3 Kapcsolt energiatermelés és a primerenergia-megtakarítás .....	37
3.5.4 Kapcsolt energiatermelés és a széndioxid kibocsátás .....	39
3.5.5 Kapcsolt energiatermelés és a villamos menetrendtartás .....	40
<b>3.6 Primerenergia-megtakarítás és széndioxid csökkenés fosszilis erőművekben</b> .....	<b>42</b>
<b>3.7 Egy forgatókönyv: a fosszilis erőművek lehetséges szerepe 2020-ban</b> ..	<b>45</b>
<b>Irodalom</b> .....	<b>47</b>



Magyar Atomforum Egyesület