

A nukleáris energia szerepe a fenntartható fejlődésben

Dr. Katona Tamás János

Paksi Atomerőmű Zrt. Paks, Pf. 71 H-7031

Absztrakt: A hosszú távú energiaellátási stratégia, amely a fenntartható fejlődés stratégiájának egyik alapvető eleme, megköveteli a kiegyensúlyozott energiaforrás-struktúra kialakítását, ami a nemzetgazdaság versenyképességét és az ellátás biztonságát egyaránt szolgálja. Az elmúlt két évtizedben, az energiapolitikák fejlődésében a környezetvédelmi, klímavédelmi szempontok erősödtek fel, míg a reálfolyamatokban a fosszilis energia-fogyasztás, és ezzel együtt a környezetterhelés globális növekedése a jellemző, emellett egész régiók, mint az EU ellátás-biztonsága is romlott. Ezek ráirányítják a figyelmet arra, hogy a politikai preferenciák alapját képező hatásvizsgálatok túlértékelik a regionális akciók, mint az EU energiapolitikai akciói hatásának globális jelentőségét, nem tartalmazzák a konkurens energetikai technológiák tudományos igényű és elfogulatlan összehasonlítását, szemet hunynak a befektetői érdekek által vezérelt reálfolyamatok felett. Jelen dolgozatban e három kérdéskört vizsgáljuk meg. Szisztematikus összehasonlító elemzésben bemutatjuk, hogy a nukleáris energia felhasználása és a nukleáris energetikai technológiák alkalmazása célszerű választás, s az energiatakarékosság és a megújuló energiaforrások fokozott ütemű bevonása mellett az atomenergia felhasználása lehet a fenntartható gazdasági fejlődés megvalósításának egyik eszköze.

Bevezetés

A XXI. század nagy kihívása az emberiség fenntartható fejlődésének megvalósítása. Ennek egy fontos eleme a fejlődés biztonságos, környezetkímélő és gazdaságos energiaellátásának biztosítása. Széleskörű egyetértés tapasztalható abban, hogy a globális fejlődéshez nélkülözhetetlen energiafelhasználás-növekedés a környezetre, a klímára irreverzibilisen káros hatásokkal jár, amit csak az energia-fogyasztás csökkentésével, az energiafelhasználás hatékonyságának növelésével, s a korszerű, emisszió-mentes technológiák alkalmazásával lehet mérsékelni. Az energiaellátás terén a villamosenergia-termelés és felhasználás a fejlődés egyik motorja, s egyben az egyik legnagyobb CO₂ kibocsátó is. Az emisszió-mentes technológiák alkalmazása a villamosenergia-termelésben a fenntartható fejlődés megvalósításának egyik alapfeltétele.

Az elmúlt két évtizedben, az energiapolitikák fejlődésében a környezetvédelmi, klímavédelmi szempontok erősödtek fel, míg a reálfolyamatokban a fosszilis energia-fogyasztás és ezzel együtt a környezetterhelés globális növekedése a jellemző, ugyanakkor egész régiók, mint az EU ellátásbiztonsága is romlott.

Ezek ráirányítják a figyelmet arra, hogy a politikai preferenciák és döntéshozatal alapját képező hatásvizsgálatok

- túlértékelik a regionális akciók, mint az EU energiapolitikai akciói hatásának globális jelentőségét;
- nem tartalmazzák a konkurens energetikai technológiák tudományos igényű és elfogulatlan összehasonlítását;
- illuzórikus képet festenek egyes energetikai technológiák fejlesztésének üteméről és kimenetéről;
- szemet hunynak a befektetői érdekek által vezérelt reálfolyamatok felett, amelyekbe a politika valójában nem bátorkodott hatékonyan beavatkozni.

Fentiek miatt a fenntartható fejlődéssel és az energiaforrások, illetve az energetikai technológiák alkalmazásával kapcsolatos nézetek, tervek, szándékok és cselekedetek kifejlődésükben és hatásaikban ellentmondásosak, és a közvélekedésre is megtévesztő hatással vannak.

A dolgokat reálisan és rendszerben kell szemlélni, s az erőforrások hasznosításáról, az alkalmazható energetikai technológiákról, azok fejlődési potenciáljáról reális képet kell alkotnunk, mert ez szabja meg azokat a technikákat, módszereket, amiktől tényleges változás várható a társadalmi, a gazdasági szférában és környezetünk minőségében is.

Az alapos vizsgálat és reális értékelés, amire az alábbiakban kísérletet teszünk, azt mutatja, hogy a nukleáris energia alkalmazásának legfőbb akadálya nem a tényszerűen igazolható hátrányaiban rejlik, hanem az elmúlt évtizedekben kialakított közfelfogásban és politikai attitűdben, amelyek lassan, de egyértelműen változnak a

tapasztalati tények és bizonyos gazdasági, ellátás-biztonsági kényszerek hatására, illetve a csalhatatlannak hitt jóslatok és megváltóként eladott megoldások kudarca láttán.

Globális megoldás vagy biztos kudarc középtávon

Tudjuk, a környezetünk kedvezőtlen változásának fő oka az elmúlt két évszázadban kifejtett emberi tevékenység, a Föld népességének megsokszorozódása és ezzel párhuzamosan a fosszilis energiaforrások felhasználásának hihetetlen mértékű megnövekedése. Köztudott, hogy a villamosenergia-termelés és felhasználás a fejlődés egyik motorja, a fejlettség egyik mutatója, s egyben a villamosenergia-termelés az egyik legnagyobb CO₂ kibocsátó. A globalizálódó világ fejlődése a villamosenergia-igény és felhasználás jelentős növekedésével jár. Ez nyilvánvaló, ha belátjuk, hogy a nem vagy alig villamosított országokban a villamosenergia-felhasználásának növekedését nem lehet elkerülni, mert ez az elmaradottság konzerválását jelentené számukra. A globális környezetterhelést azonban a fejlett országok, mint az USA, Kanada és az Európai Unió és néhány feltörekvő ország, Kína, India, Brazília kibocsátása fogja meghatározni.

A katasztrófával fenyegető, sőt már ma is katasztrófálisnak minősíthető helyzetben a fenntartható fejlődés megvalósításának alapfeltétele, hogy a felhasználás oldalán a maximális takarékoságra, a villamosenergia-termelésben pedig emisszió-mentes és a tartalékokat nem kimerítő technológiák alkalmazásra törekedjünk.

Jogosan kérdezhetjük, vajon ilyen egyszerű-e ez a dolog.

A globális értékelésnél a CO₂ emisszió egy egyszerű képlettel számolható, amely a fejlődés legfontosabb tényezőit tartalmazza [1]:

$$CO_2 \text{ emisszió} = N \times (GDP/N) \times (E/GDP) \times (C/E)$$

Azaz a CO₂ emisszió egyenlő a népesség, N, az egy főre jutó GDP termelés, GDP/N, a GDP termelés fajlagos energia-felhasználása, E/GDP, azaz az energia intenzitás és az energia-termelés karbon-intenzitásának, E/C szorzatával.

Nézzük a tényezők várható alakulását.

- N - népesség, nőni fog, elérheti a ~9 milliárdot 2050-re;
- GDP/N - egy főre jutó összjövedelem-termelés, nőni fog, különösen a felzárkózó országokban;
- E/GDP - a termelés energia-intenzitása csökkenni fog a fejlődéssel, de ez természetesen alulról korlátos, hiszen nulla energiafelhasználás-növekménnyel aligha lehet GDP növekedést produkálni, főleg nem a fejlődő országokban, legfeljebb egyes, igen fejlett gazdaságokban;
- C/E - az energiatermelés szén-intenzitása, csökkenni fog a fejlett országokban, a CO₂-mentes technológiák alkalmazása miatt, de a felzárkózó országokban ez nem valószínű, hiszen India, Kína a XXI. században a nukleáris energia mellett szénre építi energia-ellátását, s a CO₂ megkötés olyan méretekben és ütemben, mint ahogy

ezekben az országokban szükség lenne rá, nem valószínű meg.

Az egyszerű okfejtés alapján az emissziót tekintve a globális kilátások szinte reménytelennek látszanak, s teljesen kétséges az olyan akciók haszna, mint az Európai Unió „háromszor 20%” célkitűzésének megvalósítása, vagyis hogy 2020-ig az Európai Unió 20% energia-megtakarítást, 20% megújuló energia felhasználás növekedést és 20% emisszió-csökkenést érjen el. Ha ehhez minden cinizmus nélkül hozzávesszük, hogy a történeket nem a képletek, hanem az érdekek határozzák meg, akkor középtávon, 2050-ig csak a helyzet, a környezet romlásával lehet számolni.

Ahogy azt az „OECD környezetvédelmi kilátások 2030-ig” című tanulmány [2] megállapítja, amennyiben nem kerül sor új politikai intézkedésekre, az elkövetkező néhány évtized során a fenntartható gazdasági fejlődés környezeti alapjainak visszafordíthatatlan megváltoztatását kockáztatjuk. Ennek elkerülése érdekében sürgős intézkedések szükségesek főként a klímaváltozással, a biodiverzitás elvesztésével, a vízhiánnyal, a környezetszennyezés egészségre gyakorolt hatásaival kapcsolatban, valamint a veszélyes vegyi anyagokkal kapcsolatos kritikus kérdések kezelésére.

A nukleáris energia - az ésszerű választás

A fentiekből úgy tűnik, hogy a villamosenergia-termelés területén olyan megoldásokat kell keresni, amelyek a növekvő energia-igényt minimális emisszióval és környezet-terheléssel elégítik ki.

Nyilvánvaló, hogy a megújuló források alkalmazása az egyik, de nem az egyedüli megoldás, részben az alacsony energia-sűrűség, a nagy terület-igény, s részben e technológiák fejletlensége, illetve rendszer-üzemeltetési korlátok miatt. Hosszú távon biztos forrás a szén, de a tiszta technológiák iparszerű bevezetésére, a CO₂ megkötés ipari méretű megvalósítására még elég hosszú ideig várni kell. Mindezek mellett célszerű választás lehet a nukleáris energia.

Ma 439 atomerőmű működik a világon. Ezek adják az a CO₂-emissziómentes termelés felét. Jelenleg 35 atomerőművi blokkot építenek 14 országban, 2007-2008-ban hét új építkezés indult [3].

A fejlett államokban - a megújuló források igénybevétele mellett - a nukleáris energia felhasználását tekintik a jövő egyik emisszió-mentes villamosenergia-termelési módjának. Ezt egyértelműen jelzik az alábbiak:

- 1.) a meglévő, biztonságosan és környezetkímélő módon üzemelő kapacitásokat hosszú távon üzemben tartják;
- 2.) új atomerőművek építése illetve előkészítése folyik;
- 3.) újraindultak a nukleáris energetikai fejlesztések;
- 4.) több ország energiapolitikájában megjelenik a nukleáris energia alkalmazása, mint perspektivikus

opció, sőt egyes országokban, mint például az USA-ban az emisszió-mentes technológiáknak kijáró kedvezmények is megilletik (lásd [4]).

Megjegyezzük, az atomerőművi kapacitások hosszú távú üzembe tartását tekintve talán csak Németország a kivétel, de ott is változik a közvélemény (lásd például [5]), és megkezdődött a politikai vita az atomprogram felfüggesztésének felfüggesztéséről (lásd például [6]), hiszen 2010 és 2012 között a most üzemelő 17 atomerőművi blokkból hetet le kellene állítani, ami a jelen körülmények között több mint vitatható lépés.

Ezt a politikai váltást a környezetvédelmi szempontok mellett egyértelmű ellátás-biztonsági és gazdasági érvek is alátámasztják. A nemzetközi tendenciák szerint a nukleáris energia alkalmazása – bár sokak által még vitatott –, de nélkülözhetetlen eleme az elkövetkező évtizedek energiastratégiáinak.

A nukleáris energia széleskörű alkalmazását ugyanakkor az akadályozza, hogy az energetikai technológiák értékelésére irányuló vizsgálatok nem rendszerszintűek, mellőzik a technológiák mindenre kiterjedő, következetes összehasonlítását, s csak az alkalmazás egyes aspektusaival foglalkoznak, ami egyben a közbeszédet is uralja.

A korrekt és szisztematikus összehasonlító elemzésnek, amely a technológiák közötti választást megalapozza, komplexnek kell lennie, amely vizsgálja a gazdasági, környezeti és társadalmi dimenziókban ható tényezőket, s olyan, amire nem az orwelli minősítés érvényes – „egyesek egyenlőbbek”.

Az alábbiakban a nukleáris energia alkalmazásának célszerűségét mutatjuk be egy, a dolog komplex értékelést lehetővé tevő rendszerben: gazdasági, társadalmi és környezeti dimenziókban.

Az energetikai technológiák összehasonlító elemzése

Az elemzés módszertana

Az alábbiakban az adott – gazdasági, környezeti és társadalmi – dimenzióban sorra vesszük az érintett legfontosabb területeket, megmutatjuk a hatás indikátorát és annak mértékegységét, illetve egy összehasonlító elemzést mutatunk be, ami egyúttal minősíti a nukleáris energia alkalmazását.

Ez az eljárás logikailag az OECD NEA „Risks and Benefits of Nuclear Energy” című tanulmányában [7] közölt eljáráshoz hasonlít, de megállapításai nem csak erre a tanulmányra, hanem más forrásokra és saját értékelésekre, adatokra is támaszkodnak. Az értékelést dimenzióként táblázatos formában is megjelenítjük, melynek oszlopaiban az érintett terület, az indikátor, annak mértékegysége és a nukleáris energia felhasználásának minősítése szerepel.

A gazdasági dimenzió

Az atomerőmű a leginkább beruházás-igényes technológia. A termelési költség szerkezetét tekintve az 1. táblázatban megadottak a jellemzők:

1. táblázat A villamosenergia-termelő technológiák költség-szerkezete [8]

költség összetevő, %	nukleáris	gáz CCGT	szén	szél
beruházási	50-60	15-20	40-50	80-85
üzemeltetés és karbantartás	30-35	5-10	15-20	10-15
üzemanyag	15-20	70-80	35-40	0

(Megjegyzés: A táblázatban nem szerepel a vízerőmű, amelyet a nukleárishoz hasonlóan magas beruházási költség jellemez.)

A költség-szerkezetben a magas beruházási és alacsony üzemanyag összetevő inkább előny, mint hátrány, mint azt későbbiek alapján még beláthatjuk.

Itt azt kell megvizsgálni, hogy az atomerőművek versenyképesek-e a beruházási és a termelési költségek tekintetében.

Az „IEA Energy Technology Perspectives 2006” [9] című monográfia az atomerőművek létesítésének fajlagos költségét (a tanulmány készítésének időszakában) átlagosan 1500 USD/kW-ra becsülte (10% kamat és 5 év építési idő esetén), a költségtartományt pedig 1300-2000 USD/kW-ra adta meg, ahol a felső határ a demonstrációs/prototípus ár. Ebből már akkor nyilvánvaló volt, hogy a CO₂ kibocsátás akár relatíve kismértékű „büntetése”, vagy az emisszió-mentes termelés ösztönzése már messze versenyképessé teszi az új atomerőművet a gáztüzelésűekkel szemben is.

Az „IEA Energy Technology Perspectives 2006” – korábbi OECD NEA és IEA elemzésekre támaszkodva – a termelési költséget 0,021-0,031 USD/kWh-ra becsülte, 5% kamatot, 50% beruházási, 30% üzemeltetési és karbantartási és 20% üzemanyag összetevőket feltételezve. Felső becslésnél pedig 10% kamatot, 70% beruházási, 20% üzemeltetési és karbantartási és 10% üzemanyag összetevőket feltételezve 0,03-0,05 USD/kWh termelési költséget állapított meg. Ebből az következett, hogy a nukleáris energetika versenyképes a gázzal szemben, ha a gázár magasabb, mint \$5.70/MBtu, avagy az olaj ára \$40-\$45 hordónkénti szintnél magasabb.

Ez áttörést jelentett a nukleáris energia alkalmazása szempontjából. A még mindig közkézen forgó 2007 előtt készült tanulmányokhoz képest drámaian megváltozott helyzettel kell számolni 2008-tól a 100USD/hordó körüli vagy afeletti olajárak miatt. Az új atomerőművek versenyképességéhez ma nem fér kétség, amihez nem a 2008. évi 100 USD/hordó feletti olajár kell, elég, ha az tartósan 50 USD/hordó ár felett van.

Nyilvánvaló, s ezt a most futó projektek, mint a finnországi Olkiluoto-i atomerőmű építése is mutatja, az energiaárak növekedése miatt minden energetikai beruházás drágul. Egy árspirál tanúi vagyunk: Az alapanyagárak erőteljesen növekednek, aminek egyik oka az energiaár növekedése, illetve az alapanyag-igényes energetikai beruházások iránti felfokozott kereslet. Ez azonban nem gyengíti, sőt erősíti a nukleáris energia alkalmazásának gazdasági ésszerűségét.

A meglévő atomerőművek üzemben tartásának ésszerűsége közgazdasági trivialis, hiszen a tökeköltségekkel nem terhelt, s még igen hosszú ideig üzemeltethető kapacitások a legolcsóbb termelők.

A gazdasági dimenziót tekintve meg kell említeni, hogy az atomerőművek a legmegbízhatóbb termelők, a kihasználtságuk világszerte 85-93% körül van [3].

A gazdasági dimenziót tekintve az ellátás-biztonságot, az üzemanyag-piacok kiszámíthatóságát, hosszú távon pedig a forrás rendelkezésre-állását, kimeríthetőségét kell megvizsgálni. Ez a fenntarthatóság egyik attribútuma is.

A rövid távú stabilitást a nukleáris üzemanyag kompaktsága (energia-sűrűsége) és tartalékolhatósága biztosítja minden más üzemanyagnál jobban. A hazai villamosenergia-termelés csaknem 40%-át adó paksi atomerőműben kötelezően két évre elégséges friss üzemanyagot kell tartalékolni, ami egy kisebb teremben elfér.

A fajlagos mennyiségeket tekintve 1GWév energia megtermeléséhez szénből 2,5, olajból 1,6 millió tonnára, földgázból 3,9 millió köbméterre van szükség, s ugyanez nukleáris üzemanyagot tekintve hozzávetőlegesen 20 tonna, ami egy kamionnal vagy vagonnal elszállítható.

A hosszú távú stabilitás egyik kulcskérdése geopolitikai. Ebből a szempontból a nukleáris üzemanyag nem kritikus, hiszen nem a világ geopolitikai tűzfészkeiből származik.

A nukleáris üzemanyag hosszú távú rendelkezésre állása ennél izgalmasabb kérdés. Az ismert urán-készletek a mai könnyűvízes reaktorokban felhasználva alig száz évig elégségesek. Számolni kell ugyanakkor azzal, hogy ezekben a reaktorokban az üzemanyag hasadóanyag-tartalmának alig egy százaléka ég ki, s a kiegészített üzemanyagból a hasadóanyag 99%-a visszanyerhető és hasznosítható. Tudni kell, hogy ez létező és működő ipari technológia, csak politikai, főleg proliferációs okai voltak annak, hogy az alkalmazását egyes országokban átmenetileg befagyasztották.

Az ipari léptékben is kipróbált gyors-szaporító reaktorok újbóli rendszerbe állításával, zárt üzemanyag-ciklussal az uránkészletek legalább négyezer évig elégségesek, s akkor még nem számoltunk a tóriummal, mint a nukleáris üzemanyag tenyésztésben felhasználható nyersanyaggal.

A nukleáris energia alkalmazásának gazdasági ésszerűségéről megállapítottakat a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat A nukleáris energia alkalmazásának gazdasági értékelése

<i>gazdasági dimenzió</i>			
<i>érintett terület</i>	<i>etindikátor</i>	<i>mértékegység</i>	<i>a nukleáris energia felhasználásának minősítése</i>
<i>finanszírozás és termelési költségek</i>	létesítési költségek	c/kW	versenyképes 50USD/hordó olajár felett
	termelési költségek	c/kWh	
	üzemanyagár-érzékenység	termelési költség növekmény, ha az üzemanyag-ár kétszeres lesz	a legjobb, mivel az urán árának megkétszereződése kevesebb, mint 5%, s az üzemanyag költség egészét véve is ~15% költség-növekedést okoz
	rendelkezésre-állás	%	a legjobb, 85-92%
<i>üzemanyag-források</i>	tartalékolhatóság - rövid távú stabilitás	minőségi jellemzés	a legjobban tartalékolható üzemanyag
	hosszú távú stabilitás - geopolitikai tényezők	minőségi jellemzés	minimális kockázat, nem a krízisrégiókból származik
	hosszú távú rendelkezésre állás	év	az ismert uránkészletek ~4000 évre elégségesek a zárt üzemanyag-ciklus esetén; ezen felül van a tórium

A környezeti dimenzió

Ma a 439 működő atomerőmű adja az emisszió-mentes villamosenergia-termelés felét.

A nukleáris energia-termelés széndioxid emissziója elhanyagolható a többi technológiához képest, akkor is, ha a teljes életciklust, az uránbányászatot is, figyelembe vesszük. Alig hihető, de tény, egy kWh villamos energia megtermelése fotoelektromos vagy szélenergia-területében, több üvegház-hatású gáz (GHG) kibocsátással jár, mint az atomerőműben, ha a teljes életciklust (gyártás, üzem, leszerelés) számoljuk (lásd [7]). Ez érvényes lényegében az egyéb szennyezőkre is, mint az NO_x, a por, SO₂ kibocsátásra is.

Az atomerőművekben fajlagosan lényegesen kevesebb veszélyes és normál ipari hulladék keletkezik, mint más erőművekben. Nyilvánvaló, hogy a környezet védelme szempontjából minden ipari hulladék számít, s az is, hogy a veszélyes ipari hulladékok jó része, mint például a nehézfémek, örökéletűek, soha nem bomlanak le. Így hát az energia-termelés területén messze nem az egyetlen hulladék-probléma az atomerőművek radioaktív hulladéka, főleg ha azt vesszük, hogy „átlagos” szénből 1GWév villamos energiát megtermelve ~600000t hamu keletkezik, amelyben ~5t urán és ~10t tórium van. A hamu aktivitását tekintve nyilvánvalóan nem azonos az atomerőműben keletkező radioaktív hulladékkal, de az említett adatok valóságok.

Az atomerőművekben a keletkező, viszonylag kis mennyiségű radioaktív hulladék kezelése a „gyűjtés, ellenőrzés és elzárás” filozófiáját követi, nem pedig a „felhígítás és kibocsátás” gyakorlatát, amint azt a többi technológia teszi. Akut környezeti gondjaink épp ennek a „felhígítás és kibocsátás” eljárásnak következményei.

A mennyiségek megértéséhez: Ha egy négytagú átlagos európai család 25 éves villamosenergia-fogyasztását atomerőműben termeljük meg, akkor az eközben keletkezett nagyaktivitású radioaktív hulladék mindössze 1,2 deciliter térfogatot tölt ki. A radioaktív hulladékok kezelése és végleges tárolása technikailag megoldott, a problémák ezen a téren politikai és társadalmi természetűek. Ez látható a hazai kis- és közepes aktivitású hulladéktároló körüli, politikailag motivált huzavonákból, vagy ellenpéldaként épp az e tárgyban tartott helyi népszavazás eredményében, vagy külföldi példaként abban, hogy 2001-ben a finn parlament jóváhagyta az atomerőmű tároló létesítésének tervét.

A regionális környezeti hatásokat tekintve az atomerőművek által okozott hatás vagy semleges, vagy teljes mértékben elhanyagolható. Ezt konkrét esetben a paksi atomerőmű negyedszázados üzemeltetésének és a környezet állapotának tényadatai bizonyítják. Pakson, normálüzemben a dunai frissvízhűtés, s folyam hőterhelése az egyetlen érdemi környezet-terhelés, amely szigorú normákhoz van kötve, s amely normákat az atomerőmű

betartani képes. Más esetekben a hűtőtornyos, s főleg a zárt-hűtőkörös hűtőtornyok ezt a hatást is kizárják.

Van még egy fontos mutató, a terület-használat. Ebben a tekintetben a nukleáris energia alkalmazása igen kedvező, s a legkedvezőtlenebb a megújuló energiákat hasznosító technológiáké, különösen a biomasszáé. Itt érdemes egy pillantást vetni egy paksi atomerőműnyi teljesítmény terület-igényére, például megújuló technológiákkal való helyettesítés esetén. Az egyenértékű villamosenergia-termeléshez biomasszából évente ~16 millió tonnára volna szükség. Nagyon optimista számítással ez a magyar termőterület 10%-án lenne megtermelhető. Hozzávetőlegesen 2000 darab, egyenként 1MW teljesítményű szélkerék kellene teljesítmény kiváltására, aminek úgyszintén óriási a telephely igénye, de a hazai körülmények között a szélenergia-terület rendelkezésre állása 16-18% az atomerőmű 86%-val szemben, tehát a termelést még 10000 darab ilyen szélkerék sem váltaná ki. Ugyanakkor a villamosenergia-rendszer stabilitása és üzemeltethetősége érdekében, ennyi szélenergia-terület feltétlenül szükség lenne egy szivattyús tározós erőműre, amely szinte elképzelhetetlen a zöld szervezetek ellenállása miatt. A paksi atomerőmű kapacitását egy nagy Budapest méretű napelemmel lehetne kiváltani, a termelés kiváltásához, pedig arra lenne szükség, hogy éjjel-nappal folyamatosan süssön a nap.

A telephely igény nem csak környezethasználati kérdés, hanem komoly társadalmi konfliktus forrása is lehet. Hiszen, ha feltesszük, hogy a klímaváltozás miatt a termőterületek illetve az élelmiszertermelés csökkenhet, miközben a népesség globálisan nőni fog, akkor az éhezni fogó ember versenyezni fog a termőföldért a biomassza és bioüzemanyag termelével.

A környezeti dimenzióban végzett értékelés eredményét a 3. táblázatban foglaltuk össze.

Társadalmi dimenzió

A társadalmi dimenzióban történő értékelés igen komplex. A már említett hulladék-kezelés, területigény, a források biztonsága olyan mértékben hat ebben a dimenzióban, amilyen mértékben az erről alkotott eszmék, téveszmék, érzelmek befolyásolják a társadalom tagjait. A fentiekben közölték egy része is olyan, ami tény, de nem köztudomású, vagy a közvélekedéssel ellentétes.

Társadalmi dimenzióban olyan aspektusból kell értékelni a technológiákat, mint a veszélyesség (normálüzemi mortalitás), az üzemzavarok, köztük a súlyos üzemzavarok gyakorisága és következményei (fatalitása).

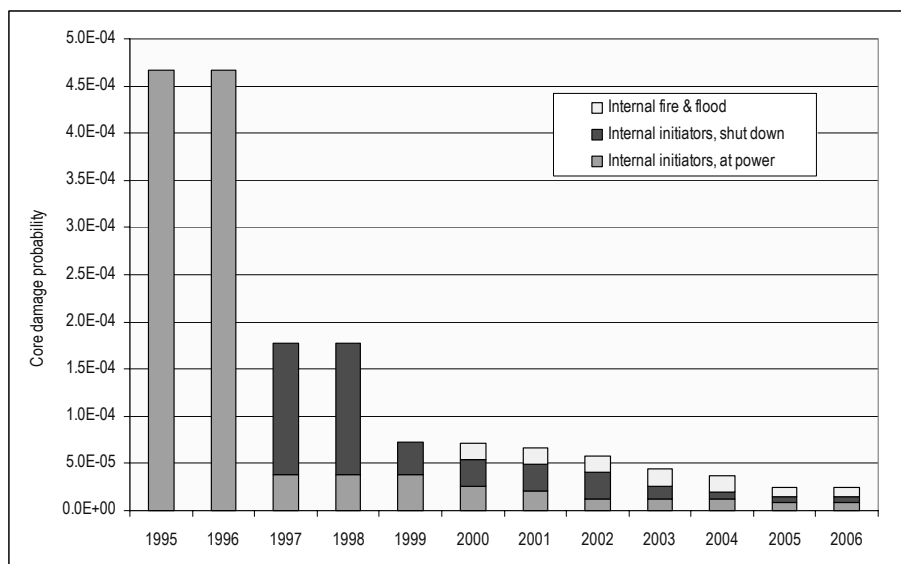
A normálüzemi mortalitásban a hagyományos technológiák vezetnek, ami könnyen belátható az atomerőművek esetében megkövetelt munka és biztonsági kultúra, valamint az üzemeltetői, karbantartói tevékenység hatósági előírások szerint formalizált, engedélyezett és ellenőrzött volta miatt.

3. táblázat A nukleáris energia alkalmazásának környezeti értékelése

környezeti dimenzió			
érintett terület	indikátor	mértékegység	a nukleáris energia felhasználásának minősítése
globális felmelegedés	CO ₂ egyenérték	t/GWh	gyakorlatilag emisszió-mentes (bányászattal és a feldolgozással együtt is)
összes hulladék	tömeg; fajlagos hulladék-tömeg	kg; kg/kWh	a fajlagos hulladéktermelés kicsi: a hulladék-kezelés a „gyűjtés, ellenőrzés és elzárás” filozófiáját követi
regionális környezeti hatás	változás a nem védett ökoszisztémában	km ² /GWh	fajlagosan igen kis érintett terület (bánya)
egyéb nem szennyező hatás	terület-igény	m ² /GWh	a legkompaktabb

A közvélekedéssel ellentétben az atomerőművek esetében a legalacsonyabb a súlyos balesetek gyakorisága. Ennek így is kell lennie, hiszen egy nukleáris baleset konzekvenciái igen súlyosak is lehetnek. Itt is érvényes a közvélekedés paradox volta: a légiközlekedést is igen veszélyesnek tartják, jóllehet a közúti közlekedés a veszélyesebb. Az atomerőművek biztonságának egyik fontos mutatója a zónaolvadás valószínűsége, vagy éves gyakorisága. Ez nem azonos a súlyos balesettel, de egy ilyen állapotból bizonyos valószínűséggel az is kialakulhat. A TMI üzemzavar és a csernobili súlyos baleset után világszerte minden atomerőműben biztonsági felülvizsgálatot hajtottak végre,

új eszközökkel és módszerekkel, mint a valószínűségi biztonsági elemzés, súlyos balesetek szimulációja, amelyeket nagyléptékű modellkísérletekkel hitelesítettek. Az elemzések alapján jelentős biztonságnövelő programokat hajtottak végre. A biztonságnövelő intézkedések hatására a zónaolvadás valószínűsége a paksi atomerőműben több mint egy nagyságrendet javult (azaz csökkent a zónaolvadás valószínűsége), s ez az érték most $\sim 10^{-5}$ /év, ahogy ezt az 1. ábra mutatja. Ez általános tendencia minden atomerőműben az elmúlt két évtizedben.



1. ábra: A zónaolvadás gyakoriságának csökkenése a paksi atomerőműben a biztonságnövelő intézkedések eredményeként

Az atomerőművek egészségügyi hatásokkal járó súlyos baleseteinek kockázata elhanyagolható, gyakorisága kisebb, mint 10^{-7} /év.

Társadalmi dimenzióban kell értékelni a hulladéktárolás idejét is. Ez a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék esetében 600 év (ez minimum 20 felezési idő, s ekkora az

aktivitás a természetes háttérbe belesimul). A nagyaktivitású radioaktív hulladék esetében az izotópok felezési ideje igen hosszú lehet. A nagyaktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére indult kutatások, s jelenlegi nemzetközi gyakorlat egyértelműen igazolja, hogy a radioaktív hulladékok, illetve a kiégett üzemanyag elhelyezése technikailag ma is megvalósítható a társadalom,

a környezet maximális védelme mellett. A most folyó kutatások a kiegészítő üzemanyag és a radioaktív hulladék kezelésének és elhelyezésének még hatékonyabb módjait ígérik. Léteznek, illetve fejlesztés alatt vannak az aktinidák kiegészítésére alkalmas technológiák, amiről a nukleáris energetika fejlődési potenciáljával kapcsolatban még szólnunk. A nem hasznosítható nagyaktivitású hulladék (nem a kiegészítő üzemanyag, mert az újra hasznosítható) véglegesen elhelyezhető mély geológiai tárolókban.

Az atomerőművek megtestesítik a korszerű tudomány, a műszaki fejlesztés számos eredményét és igen fejlett műszaki-tudományos hátteret, magas szakmai és biztonsági kultúrát igényelnek. A nukleáris energetika komoly infrastruktúrát és high-tech munkahelyeket teremt. A paksi gyakorlat is igazolja, az atomerőmű a legnagyobb regionális foglalkoztató, s támogatója a telephely körül élő közösségeknek, iskoláknak, egyetemeknek stb.

Fontos szempont a proliferáció, de nyilvánvaló, az atomsorompót nem az atomenergetikusok, hanem a politikusok törték, török fel.

A társadalmi dimenzióban végzett értékelés eredményét a 4. táblázatban foglaltuk össze.

A méret, a mérték hatása

Vitathatatlan tény, hogy negatív hatások vagy a technológia kiforratlansága vagy inherens sajátosságai miatt léteznek

minden energetikai technológia esetében, még az úgynevezett zöld technológiák esetében is.

A technológiák összehasonlításánál, illetve az egyes technológiák energiaellátási rendszerbe való integrálásánál figyelembe kell venni a méret, a mérték hatását. Addig, amíg a kedvezőtlen adottságú technológiák, az energiaellátás rendszerében kis hányadot képviselnek, a negatív hatásokról, lévén azok marginálisak, hajlamosak vagyunk megfeledkezni. Marginálisnak minősülő probléma az egyes technológiák túlzott terület-igénye, a teljes életciklus alatt keletkező hulladék, az állami támogatás igénye, vagy a villamos hálózat stabilitására gyakorolt hatása, ha az ilyen alkalmazások a rendszerben kis súllyal vannak jelen.

Dramáiban megváltozik a helyzet, ha az ilyen technológiák elterjedésének eredményeként a társadalom, a fogyasztó, vagy a rendszerirányító szembesülni kénytelen az elhallgatott, vagy figyelmen kívül hagyott negatív hatásokkal.

Ilyen hatásokra akár a közelmúltban bekövetkezett globális élelmiszerár-növekedés is példa lehet, amelynek egyik, bár nem kizárólagos oka az energetikai célú mezőgazdasági termelés állami támogatással is elősegített térhódítása volt nagy élelmiszertermelő országokban. Ugyanez a folyamat mellékesen az esőerdők fokozott kiirtásához is vezetett.

4. táblázat A nukleáris energia alkalmazásának társadalmi értékelése

<i>társadalmi dimenzió</i>			
<i>érintett terület</i>	<i>indikátor</i>	<i>mértékegység</i>	<i>a nukleáris energia felhasználásának minősítése</i>
<i>társadalmi fenntartások</i>	fatalitás egy baleset esetén	fő/baleset	biztonságos
<i>normálüzemi egészségi hatások</i>	mortalitás	várható élettartam csökkenés/GWh	biztonságos
<i>súlyos üzemzavar</i>	fatalitás	fatalitás/GWh	~10 ⁻⁸ /év a hatósági dóziskorlátot meghaladó kibocsátás valószínűsége
<i>a kritikus hulladék tárolási ideje</i>	idő	év	több száz év, de transzmutációs fejlesztésekkel csökkenthető
<i>helyi hatások</i>	zaj, látvány	minőségi	nem szignifikáns
<i>foglalkoztatás</i>	technológia-specifikus munkahelyek	ember-év/GWh	high-tech, tudásigényes, magasan kvalifikált, igen fejlett munkakultúrát igényel, biztonsági kultúra
<i>proliferáció</i>	potenciál	minőségi	Nem az atomerőművek miatt törték fel az atomsorompót!

A szélerőművek villamosenergia-rendszerbe való beilleszthetőségénél is szembesülünk a mérték problémájával, ugyanis a szélerőművek kapacitásának növelésével egyre inkább kritikussá válik a rendszer stabilitása, irányíthatósága, ami korlátozza az ilyen kapacitások összteljesítményét.

Ma a promóciós programok meg sem említik, hogy a szél és a napenergia hasznosítása során, a teljes életciklus alatt keletkező veszélyes ipari hulladékkal törődni kell, épp úgy, mint az atomerőművek radioaktív hulladékával. Nem tárgya ez a társadalmi diskusszióknak sem, hiszen e technológiák kis elterjedtsége miatt ezzel a társadalom nem szembesül. Az meg végképp nem tudatosult, hogy épp az ilyen technológiák esetében a teljes életciklus hulladékmennyisége a teljes megtermelt energiámmennyiségre vetítve elég kedvezőtlen.

Az energetikai technológiák tárgyilagos összehasonlításánál tehát nem hagyhatjuk figyelmen kívül sem a rendszerbeli korlátokat, sem pedig azokat a hatótényezőket, amelyek a demonstrációs vagy erősen promóciós fázisban lévő technológiák esetében átmenetileg még elhanyagolhatóak, de a technológia térnyerése esetén gazdasági, környezeti problémát okozhatnak.

A nukleáris energetika fejlődési potenciája

Az új évezred kezdetén a nukleáris energetika fejlődését a fenntartható fejlődés igénye, de mindenekelőtt az egyre növekvő energia-éhség kielégítése hajtja, s az a globális küzdelem, amely a forrásokért folyik. Ezt jelzi az USA 2005. évi energiapolitikája [4], a nukleáris energetika terén kialakítani javasolt Global Nuclear Energy Partnership [10] és még számos nagy nemzeti vagy nemzetközi fejlesztési projekt. Új, az elvárásokhoz igazodó innovatív reaktorok fejlesztése elindult, s a hidrogén energetikai kutatások is felgyorsultak.

Az aktuális atomerőmű építési igényeket az ipar az elmúlt évtizedek fejlesztési, gyártási és üzemeltetési tapasztalatainak hasznosításával kifejlesztett úgynevezett Generation III és III+ reaktortípusokkal elégíti ki. Ezek lényegében a meglévő atomerőművek lineáris továbbfejlesztései: a kipróbált s a gyakorlatban bevált megoldások alkalmazásával magas biztonsági és rendelkezésre állási színvonalat, bizonyos gyártási-szerelési technikákkal némileg olcsóbb létesítményt képviselnek. Különlegességként megjelennek egyes, inherensen biztonságos tulajdonságok, amelyek biztonsági funkciókhoz a gravitációs hajtást, a természetes cirkulációs hűtést alkalmazzák, amelyek működtető erőforrást nem igényelnek.

Az innovatív, minőségileg új alkalmazási irányokat a negyedik generációs atomerőművek képviselik, amelyek fejlesztése intenzíven folyik.

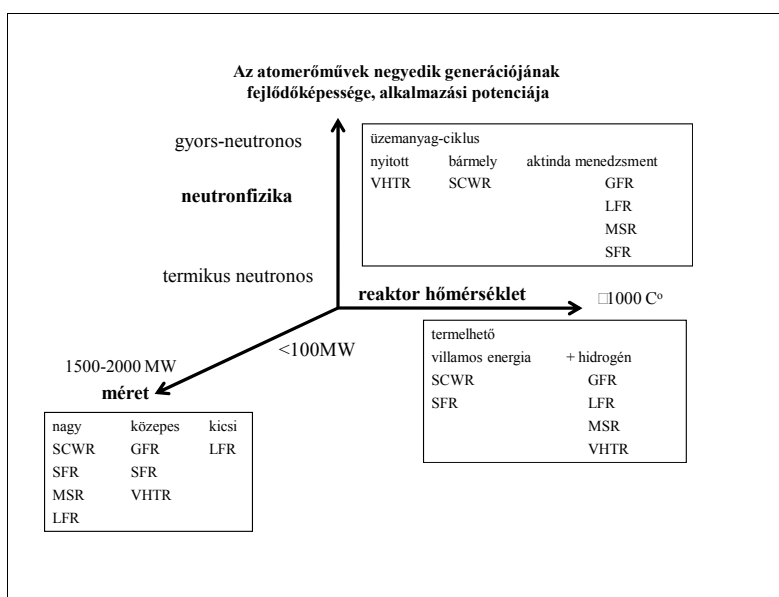
Érdeemes megmutatni, milyen fejlődési potenciállal rendelkeznek ezek a rendszerek s általuk a nukleáris energetika. A fejlődési potenciált az alkalmazások sokféleségével és a fejlesztés, bevezetés ütemével lehet demonstrálni.

A fejlesztés alatt lévő reaktor, illetve erőmű típusok sokfélesége igen figyelemreméltó.

A most létező és fejlesztés alatt álló reaktorok az egységteljesítmény tekintetében lehetnek kis, közepes és igen nagy teljesítményűek (a finn ötös blokk 1600MW villamos teljesítményű).

A technológiai közeg, a hűtőközeg hőmérséklete lehet néhány száz °C, de elérheti a hidrogén-gyártás technológiai hőmérsékletét.

Neutronfizikai szempontból pedig lehet a reaktor termikus, lehet gyors-neutronos, amellyel az üzemanyag szaporítása megoldható, sőt megoldható az aktinidák kielégése is. Ezt illusztrálja a 2. ábra.



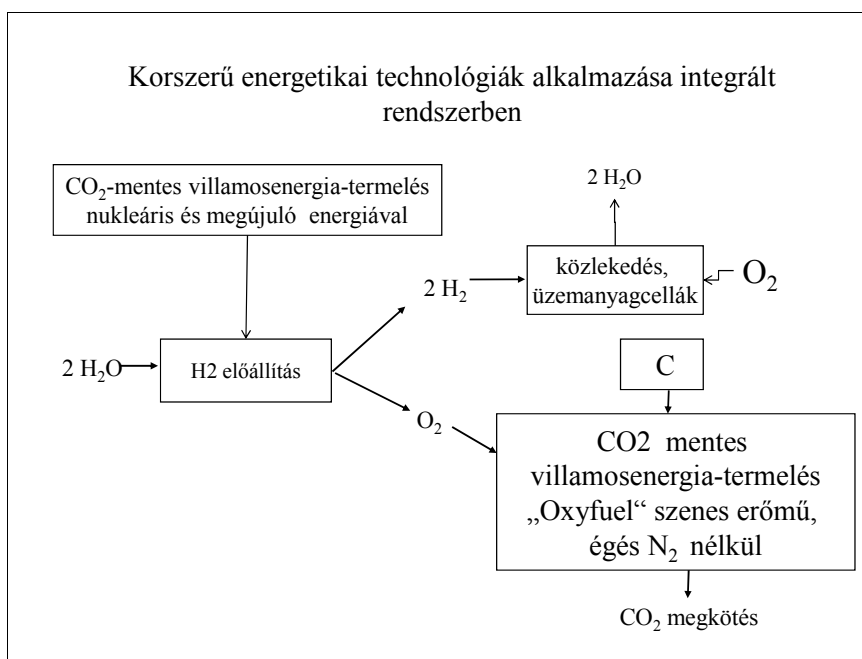
2. ábra: Az atomerőművek negyedik generációjának fejlődési potenciája

Nem érdektelen az új típusok ipari alkalmazásának időpontja sem, ami várhatóan az alábbiak szerint alakul:

- 2015 Nátrium-hűtésű gyorsneutronos reaktorok (SFR)
- 2020 Nagyon magas hőmérsékletű reaktorok (VHTR)
- 2025 Magas hőmérsékletű gázhűtésű gyorsneutronos reaktorok (GFR)
- 2025 Ólom-hűtésű gyorsneutronos reaktorok (LFR)
- 2025 Sólóvadék-reaktorok (MSR)
- 2025 Szuperkritikus vízhűtésű reaktorok (SCWR)

Egy ilyen sokoldalú energetikai technológia könnyen illeszthető egy korszerű energia-ellátási rendszerbe, ahol a megújuló és a nukleáris energia villamosenergia-termelésre illetve hidrogén-termelésre használható. A hidrogén a közlekedés új üzemanyaga, az oxigén a szén korszerű eltüzelésénél használható fel, a CO₂ megkötésével. Ezt illusztrálja a 3. ábra.

Ilyen típusú technológiai rendszerek, valamint a fogyasztás racionalizálása oda vezethet, hogy 2050-ig akár 50%-kal csökken globális mértékben a CO₂ kibocsátás az 1990-es szinthez képest, miközben fejlődhet a világ, s kenyér jut a Föld egyre több lakosának.



3. ábra: Korszerű energetikai technológiák integrált alkalmazása

A nukleáris energetika reneszánsza

A technológiák mutatóit összehasonlítva megállapítható, hogy az atomerőművi villamosenergia-termelés koncentrált, olcsó, hatékony, biztonságos és környezetkímélő; előnyei messze felülmúlják a hátrányait, a relatíve bonyolultabb és költségesebb technológiát, és az úgyszintén nagy körültekintést igénylő hulladékkezelést.

Megállapítható ugyanakkor, hogy a nukleáris energia alkalmazásának legfőbb akadálya nem ezekben a problémákban rejlik, hanem az elmúlt évtizedekben kialakított közfelfogásban és politikai attitűdben. Ez lassan, de biztosan változik, épp a csalhatatlannak hitt jóslatok és a megváltónak eladott megoldások kudarca láttán.

A nemzetközi tendenciák

Jelenleg 35 atomerőművi blokkot építenek 14 országban, 2007-2008-ban hét új építkezés indult.

Az Egyesült Államokban 104 atomerőmű van. A közelmúltban teljesítmény-növeléssel több blokknyi kapacitást hoztak létre. Szinte kivétel nélkül minden atomerőmű üzemidejét húsz évvel, negyvenről hatvan évre meghosszabbítják. Folyik több új atomerőmű típus terveinek hatósági minősítése. Új atomerőművek építését készíti elő 17 szolgáltató, illetve konzorcium, s csak 2007-ben 29 új blokk engedélyezését indították el vagy foglalkoztak előkészítésével. Az Egyesült Államokban az atomerőművek létesítése és fejlesztése az emisszió-mentes technológiáknak kijáró állami támogatásokat élvez.

Az Európai Unióban több mint 140 atomerőmű adja a villamosenergia-termelés közel 30%-át. Európában is tanúi lehetünk a nukleáris reneszánsznak: általános gyakorlat a teljesítmény-növelés és az üzemidő-hosszabbítás. Az egyetlen ország, amely ma következetesen megvalósítani kívánja a fokozatos felhagyás politikáját, Németország, de már ott is egyre nagyobb arányban támogatja a közvélemény az atomerőművek továbbüzemelését. Új atomerőmű épül a finnországi Olkiluoto-ban és a

franciaországi Flamanville-ben, illetve Romániában és Bulgáriában. Finnországban már benyújtották egy új, a hatodik blokk környezeti hatástanulmányát, s hasonlóan Litvániában, Szlovákiában, Csehországban, az Egyesült Királyságban is új atomerőművek építését készítik elő.

Az Európai Unióban a nukleáris energia megváltozott értékelését számos aktualitás is bizonyítja:

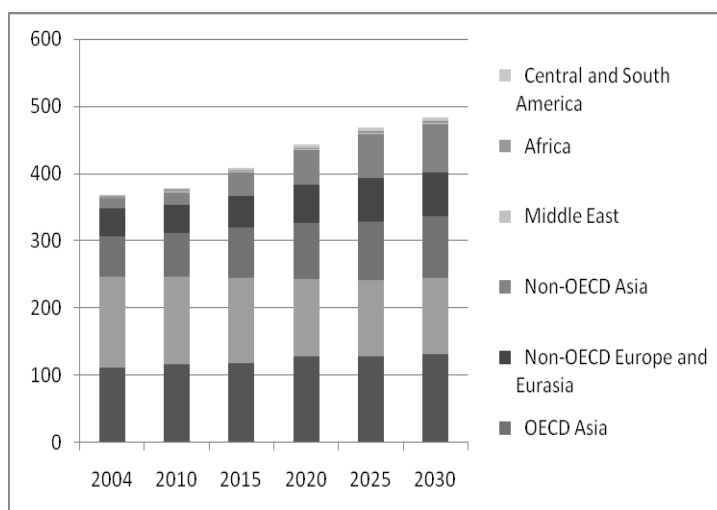
- 2007 ősszén jött létre a Sustainable Nuclear Energy - Technology Platform;
- Európai Parlamenti képviselők 2007. november 22-én - az ENSZ december 5.-i Klímaváltozási Konferenciája előtt - nyilatkozott tettek annak érdekében, hogy ismerjék el a nukleáris energia alkalmazását CO₂-mentes technológiának;
- 2007. november 26-27-én tartotta első ülését az European Nuclear Energy Forum;
- Az Unióban a közvélemény is változik, teljes váltás történt például Svédországban, változás tapasztalható a legtöbb országban.

Nem lehet figyelmen kívül hagyni a nukleáris energetikát azért sem, mert ez adja a villamosenergia-termelés jelentős részét az Európai Unióban. Valójában a több mint 130 atomerőművel Európa összességében pro-nukleárisnak nevezhető.

Több atomerőművel eddig nem rendelkező ország jelentette be építési szándékát.

A nemzetközi tendenciák szerint, a nukleáris energia alkalmazása, bár sokak által még vitatott, de nélkülözhetetlen eleme az elkövetkező évtizedek energiastratégiáinak.

Tanulságos, hogy az US DoE EIA évente megjelenő Annual Energy Outlook című tanulmánya, amely görgő prognózist ad, most 2030-ig az USA és a Világ energia-igényéről és annak kielégítéséről, évről-évre felfelé módosítja a nukleáris energia részarányára vonatkozó becslését. A legutóbbi, a 2008-évi jelentés előzeteséből vett 4. ábra azt mutatja, hogy a nukleáris energia hányada monoton nőni fog, jóllehet ebben nem szerepel az európai atomerőművek üzemidő hosszabbítása révén megmaradó kapacitás, hanem a hivatalos leállítási ütemezéssel számolnak.



4. ábra: A nukleáris energia szerepének prognózisa [11]

A nukleáris energetika jelene és jövője hazánkban

A magyar villamosenergia-termelés szerkezete jelenleg kiegyensúlyozott, és a rövid-távú fejlődési tendenciákat tekintve, a megújuló források támogatott felhasználását is beleszámítva, lehetővé teszi a környezetvédelmi kötelezettségek teljesítését. Ebben a szerkezetben meghatározóan pozitív szerepe van - mindhárom alapkövetelményt tekintve - a paksi atomerőműnek. A paksi atomerőmű egyértelműen javítja az ország ellátásbiztonságát, tekintettel arra, hogy az üzemanyag beszerzés diverzifikálható, az üzemanyag jól tartalékolható, s az üzemeltető ma is két éves tartalékkal rendelkezik. Az atomerőműben a villamosenergia-termelés költsége, más

technológiákhoz képest nem érzékeny az üzemanyag árára. A paksi atomerőmű a legolcsóbban és emisszió-mentesen termel, versenyképes, s ez a versenyképesség hosszú távon is fenntartható.

Figyelembe véve hazánk villamosenergia-ellátásának helyzetét, az igények és a kapacitások alakulását, már most időszerű mérlegelni, hogy a 2020 körüli időre előjelzett kapacitás-hiányt milyen fejlesztésekkel célszerű kielégíteni. Erre a hosszú távú gondolkodásra azért is szükség van, hogy biztosíthassuk a fenntartató fejlődés stratégiai céljai és az energetikai fejlesztések közötti összhangot.

A rendelkezésre álló más források és technológiák mellett, s figyelembe véve a megújuló energiák támogatott felhasználását, a nukleáris energia felhasználása hazánkban is reális megoldást jelent a fenntartható fejlődés feltételeinek

biztosítására, a klímavédelmi célok elérésére. Ezt igazolja a paksi atomerőmű több mint negyedszázados üzeme, amely során az atomerőmű az ország éves villamosenergia-szükségletének közel negyven százalékát adta, legolcsóbban és a környezet terhelése nélkül.

A fenntartható fejlődés követelményeivel harmonizáló energia-stratégia meghatározása hazánkban megtörtént. Az energiaellátás hosszú távú stratégiája, amely a fenntartható

fejlődés stratégiájának egyik alapvető eleme, megköveteli a kiegyensúlyozott energiaforrás-struktúra kialakítását, ami a nemzetgazdaság versenyképességét és az ellátás biztonságát egyaránt szolgálja.

A jövőt tekintve – megítélésünk szerint – a nukleáris energia alkalmazásának hosszú távon helye van hazánk energia-ellátásában, amit éppen a fenntarthatóság következetesen alkalmazott érvrendszerével lehet alátámasztani.

Irodalomjegyzék

- [1] Jean-Marc Jancovici: *The Kaya Equation*, 2003, <http://www.manicor.com/>
- [2] „OECD környezeti kilátások 2030-ig”, *OECD environmental outlook to 2030*, http://www.oecd.org/document/20/0,3343,en_2649_37465_39676628_1_1_1_37465,00.html
- [3] Nemzetközi Atomenergia Ügynökség, PRIS adatbázis, <http://www.iaea.org/programmes/a2/>
- [4] US Energy Policy Act, 1995, www.epa.gov/oust/fedlaws/publ_109-058.pdf
- [5] Umfrageergebnis anzeigen: Soll der Ausstieg aus der Atomkraft in Deutschland verschoben werden? - Augsburger Allgemeine, <http://www.community.augsburger-allgemeine.de/forum/thema-des-tages/3396-atomausstieg-und-zwischenfaelle-kernkraftwerken-62.html>
- [6] Dr. Georg Nüßlein, Ausstieg aus der Kernenergie überdenken, Rede zum Umweltschutz, http://www.cducsu.de/Titel__Rede_Ausstieg_aus_der_Kernenergie_ueberdenken/TabID__1/SubTabID__2/InhaltTypID__2/InhaltID__10758/Inhalte.aspx
- [7] OECD NEA „Risks and Benefits of Nuclear Energy” (OECD 2007, NEA No. 6242)
- [8] World Energy Council, *The Role of Nuclear Power in Europe January 2007*, <http://www.worldenergy.org/publications/309.asp>
- [9] *Energy Technology Perspectives 2006 - Scenarios & Strategies to 2050*, IEA, http://www.iea.org/textbase/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1693
- [10] Global Nuclear Energy Partnership, <http://www.gnep.energy.gov/>
- [11] DoE EIA International Energy Outlook – 2008, <http://www.eia.doe.gov/oi/aff/ieo/>