

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK



LIPCSEI GÁBOR

TDK DOLGOZAT

**Komplex energetikai rendszermodellezés többváltozós
optimalizálási eljárások segítségével**

Témavezető:

Dr. Bihari Péter

egyetemi docens

Budapest, 2013

Szerzői jog ©Lipcsei Gábor, 2013.

Szerzői jog ©Dr. Bihari Péter, 2013.

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ezen TDK dolgozat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéke által a TDK dolgozatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek maradéktalanul eleget tesz. E TDK dolgozatot a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja:

Dr. Bihari Péter

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Lipcsei Gábor* (A1TVHH), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a TDK dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2013.

Lipcsei Gábor

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó.....	1
1. Bevezetés	2
2. Fogalmak és definíciók.....	3
2.1. Rendszer és modell	3
2.2. Analitikus-, szintetikus- és rendszerszemlélet	4
2.3. Komplexitás	6
3. Többváltozós optimalizáló módszerek	7
3.1. A nemlárendeltség elve	8
3.2. Preferencia-orientált megközelítési módok [1].....	8
3.2.1. Súlyozott összeg módszer	8
3.2.2. (Fuzzy-logika).....	8
3.2.3. Hasznosság-elmélet.....	9
3.2.4. Célprogramozás	9
3.2.5. Lexikografikus	10
3.2.6. Többváltozós genetikusan algoritmusok	10
3.3. Utópreferencia-orientált módszer.....	11
3.4. Interaktív módszer.....	11
3.5. Hibrid módszerek	12
4. Létező világ- és energetikai modellek	13
4.1. World3 modell	13
4.2. MARKAL modell	14
4.3. World Energy Model.....	14
4.4. Több szempontú értékelési rendszer [6]	14

4.4.1. Az öt változat	15
4.4.2. A cikkben használt döntési modell	17
4.4.3. A felhasznált szempontrendszer a cikk alapján	18
4.4.4. Az eredmény	21
4.5. Többváltozós energiamix optimalizálás [12]	23
4.5.1. Optimalizálás	23
4.5.2. Eredmények	24
4.5.3. Konklúzió.....	24
5. Modell felépítése és jellemzői	25
5.1. A modell szerkezete	26
5.2. Energetikai mutatók	29
5.3. Modell alkalmazhatóság, forgatókönyvek	34
5.3.1. Atomjövő - „a paleolit táplálkozás”	35
5.3.2. Megújuló - „vegetáriánusként is lehet”	37
5.3.3. Szél-atom-szén - „nincs jobb a hazainál”	38
5.3.4. Összehasonlítás, értékelés	39
5.4. Kitekintés	42
6. Összegzés.....	46
7. Felhasznált irodalom.....	48
8. Ábrák jegyzéke	52

ELŐSZÓ

Egy ország energetikai jövőjének a tervezését igen sok tényező határozza meg. Alapvetően egy hétköznapi döntés meghozatalához is általában több tényezőt kell figyelembe venni. Az ilyen hétköznapi döntéseket könnyedén meg tudjuk hozni, ha átlátjuk a helyzetet, figyelembe vesszük a tényezőket, mérlegelünk és döntünk. Egy összetett problémánál esetleg már felsorakoztatjuk a pro- és kontra érveket is egy lapra leírva, hogy segítsük az átláthatóságot. Egy ország energiamix célszámainak a meghatározása azonban már bonyolultabb feladat.

Ebben a munkában arra vállalkoztam, hogy egy olyan modell alapjait fektessem le, amely önállóan képes objektív módon összeállítani egy adott ország, régió, térség optimális energiamixét több szempont figyelembevételével. Fontos elvárásként tűztem ki célul, hogy a megadott fizikai, földrajzi, geológiai korlátok mellett elfogulatlanul határozza meg a célszámokat. Gondoljunk bele, hogy egy ilyen modell segítségével hány, elfogultságból fakadó vitát előzhetünk meg?

* * *

Budapest, 2013. október

Lipcsei Gábor

1. BEVEZETÉS

Az egyszerű előrejelzések esetében könnyen foghatjuk a múltbéli mért adatokat és egymásután rendezve őket látszódnak a változás tendenciája a skálázásból és a meredekségből. Egyszerű vonallal összekötve és azt meghosszabbítva kész is van az előrejelzésünk. Érezhetjük, hogy bizonyos esetekben azért ez túl egyszerű. Egy összetettebb problémakör leírásánál az átláthatóság és az egyszerűsítés céljából a modellkészítés eszköztárához nyúlhatunk, ennek megfelelően a dolgozat első részében a rendszerelmélet és a rendszerszintű modellezés témáját járrom körbe.

Az energiapolitikai döntéseknél a döntéshozónak több, egymással nehezen összehasonlítható szempont szerint kell dönteni. Ezt megkönnyítő irányzat, hogy megpróbáljuk az egyes elvárásokat valamilyen közös nevezőre hozni, majd egy módszer szerint összevetni ezeket. Az ilyen problémák matematikai modellezéséhez több módszert találtak ki, a 3. *fejezetben* ezeket ismertetem. A különböző megközelítések más-más bonyolultsági fokkal rendelkeznek, amelyek a döntési modell felállításánál jelentős eltéréseket adhatnak.

Számos modell készült már különböző igények kielégítésére a kisebb, célzott modellektől kezdve az egészen ambiciózus világmodellekig. A 4. *fejezetben* áttekintem ezeket. Már léteznek különböző kutatások ahol a több szempontú modellezést energiamix scenáriók értékeléséhez használták fel, illetve olyanok is, amiben egy szempont szerint optimalizálták Magyarország energiamixét a jövőre nézve, azonban a két irányzatot Magyarországra még nem egyesítették. A 5. *fejezet* keretében lefektetem a két módszert egyesítő modell alapjait. Bemutatom bővítési lehetőségeit és módszertanát, majd vizsgálom a modell alkalmazhatóságát kisebb régiós, kistérségi méretekben is.

2. FOGALMAK ÉS DEFINÍCIÓK

2.1. Rendszer és modell

Egy téma tárgyalásánál előnyös, ha már az elején definiáljuk a használt fogalmakat a félreértések elkerülése végett. Sajnos a „rendszer” és „modell” esetében nem egyértelmű a dolgunk. Különböző területeken mást értenek e szavak alatt, Szücs Ervin munkái [22, 24] elején a különböző lexikonok és szótárak értelmezésével kezdi a téma tárgyalását. Ezek alapján nem von le végső következtetést és nem alkot egységes definíciót sem a rendszer, sem a modell fogalmára. Véleménye szerint nem is szükséges szigorú egységes definíciót adni ezekre a tudományos igényességű tárgyaláshoz. Egyrészt azért, mert valószínűleg nem is lehetséges, másrészt pedig elsősorban az elérendő célokat kell definiálni, nem pedig a fogalmakat.

Azonban a legtöbb értelmezés szerint a műszaki rendszerre aggathatunk néhány általános tulajdonságot, ha nem is adunk pontos definíciót. Ezek alapján a műszaki rendszer egy behatárolt, zárt egész, amely részekből tevődik össze. A részek kapcsolatban állnak egymással és együtt a zárt rendszerben olyan sajátossággal rendelkeznek, amivel külön-külön nem. Kívülről a környezet veszi körbe, a határoló részt pedig peremnek nevezzük.

A „modell” szó értelmezésében sincs egyszerű dolgunk, azonban itt már több fogódzkodónk van. A több területi értelmezésből ebben az esetben is szintén csak a műszaki-tudományos vonallal foglalkozunk. Egy modell esetében a valóság egy részét képezzük le oly módon, hogy a számunkra vizsgálandó jelenséget a valósághoz hasonlóan visszaadja, a vizsgálat szempontjából lényegtelen elemeket elhanyagolva vagy leegyszerűsítve. Szücs szerint [22] *„a modell mindig csak valamihez viszonyítva modell, és ebbe a viszonyításba nemcsak a szempontok (mi szerint?), hanem a hierarchia szint (milyen mélységig?) is beleértendő. Ebből következik, hogy nincs értelme általában modellről beszélni.”* Ugyanitt említi, hogy *„a modell hasonló a modellezetthez, vagyis az modell, ami a modellezettel hasonlósági relációban van.”* Itt már megjelenik a hasonlóság fogalma, amiről másik munkájában [21] a következő két mondat tartalmi egyenlőségével így fogalmaz: *„Különféle dolgoknak közös tulajdonságaik vannak és eszerint egy halmazba tartoznak. Különféle dolgok egymáshoz hasonlóak.”*

Összegezve a gondolatokat az alábbi módon jellemzi [22]:

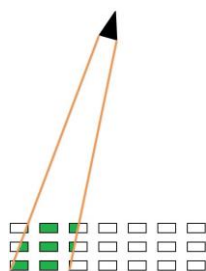
"A modell tehát rendszer:

- *célja az emberi megismerési folyamat elősegítése, újabb ismeretek szerzése;*
- *egymással kölcsönhatásban lévő részekből (a modell elemeiből) összeálló (összeállított) szerves egész;*
- *meghatározott „környezetével” (az ún. modellezettel) hasonlósági összefüggésben van, nélküle nem is értelmezhető.”*

2.2. Analitikus-, szintetikus- és rendszerszemlélet

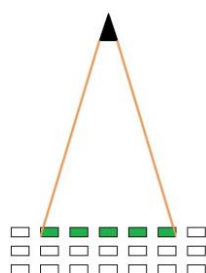
A fogalmak körülhatárolása után foglalkozzunk a szemléletmódokkal egy keveset. Az ember a világról szerzett ismeretanyag megszerzése során az elemző gondolkodást követte, azaz megfigyelte a természet jelenségeit és azokat elemezte, írta le és így tudta megérteni. Ezzel a folyamattal akkor tudásra tett szert, ami szükségessé tette a különböző tudományágak kialakulását, mivel az egyén már egyre nehezebben tudta átlátni az egészet. Egy bizonyos mélységi szint után különböző tudományterületek váltak ki egymásból és szinte önállósultak. Ezzel a folyamattal a polihisztorok kora lassan lejárt.

Ennek az elemző, *analitikus szemléletnek* az alapvető funkciója az ismeretszerzés, megfigyelések és tapasztalatok gyűjtése során. A szerzett ismeretanyag raktározása és továbbadása mellett a rendszerezés és a lényeg kiszűrésével magyarázatot tud adni a jelenségekre. A folyamat során egyre apróbb részrendszerekre bontja szét, elemzi a rendszereket, így mélyebb magyarázatot adva a jelenségekre és mélyebb tudást szerezve. A művelői szélsőséges esetekben beszűkíthetik látásmódjukat, elfogultak lehetnek a saját területükkel szemben és "szakbarbárokká" válhatnak. Előnye ugyanakkor, hogy nagyon precíz és reprodukálható módon dolgozik.



2-1. ábra. Analitikus szemlélet

Ezzel szemben a *szintetikus szemlélet* a különböző tudományterületeket próbálja összegezni, integrálni. Természetes folyamatnak is lehet nevezni, hogy az analitikus szemlélet ellenpólusaként létrejött ez az irányzat. Jelentősége abban rejlik, hogy egy adott probléma esetén több tudományág bevonásával, különböző szemszögekéből vizsgálja és keres megoldást az esetre. Feltárja hasonlóságokat és közös alaptörvényekben próbálja megfogalmazni, amit utána többrétűen lehet alkalmazni. Természetesen, mint mindennek, ennek is lehetséges túlkapása, mégpedig amikor már erőltetve egyesíti a különböző területeket, önmagában az egyesítés kedvéért, az eredeti célt, azaz a probléma megoldást szem elől veszítve. Hibái lehetnek, az esetleges túlzott egyszerűsítések és a káros hasonlóságok, analógiákra való építkezés. Ugyanakkor nagy előnye, hogy kezdeményezi a mai elszigetelt világunkban a tudományközi kommunikációt és munkát, mert a problémának mindig több oldala van.



2-2. ábra. Szintetikus szemlélet

A *rendszer szemlélet* a két fentebb említett szemléletmódok egészséges ötvözése. A rendszer szemlélet felismeri, hogy az egyes problémák a részrendszerekben jelentkeznek, azaz fel kell ismerni és be kell illeszteni a megfelelő szintre és ott vizsgálni. A rendszer szemlélet során keressük az összefüggéseket és kapcsolódási pontokat más tudományterületekkel, nyitottak vagyunk más gondolkodásmódokkal, megoldásokkal szemben és képesek vagyunk befogadni azokat. Ráismerünk a világ komplex működésére és a problémákat más

tudományterületekkel egyeztetve oldjuk meg. Tehát összességében nyitottak, befogadók és toleránsak vagyunk.

2.3. Komplexitás

A komplex szó értelmezésénél és használatánál erősen változó szokásokat lehet találni. A legalapvetőbb, hogy az összetett és bonyolult szavak szinonimájaként használják. Másol [5] már a rendszerszemlélettel kapcsolatosan tárgyalva olyan rendszerekre használják, ahol már a feladat alrendszerek használatát kívánja meg, tehát ha alrendszerekkel rendelkezik, akkor komplex, bonyolult. (Például energetikai rendszermodellezésnél figyelembe veszi és külön tárgyalja a villamosenergia-termelési, a hőtermelési- és a közlekedési alrendszert.) Azonban azt is meg kell említeni, hogy az Eötvös Lóránd Tudományegyetemen működik Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék is.

Amennyiben alaposan akarjuk körbejárni a komplex rendszerek fogalmát, akkor a fizikai megközelítésből nyugodt szívvel indulhatunk ki. Több témában is megjelenik és használják a komplex rendszerek fogalmát, mint például a kollektív viselkedés, játékelmélet, hálózatok, evolúció és adaptáció témakörökben. Néhány közös vonás azonban kijelenthető a komplex rendszerekre [MCS - Springer]:

1. Nagyszámú, egymással kölcsönható elemet tartalmaz.
2. Emergens (kibontakozó) viselkedést mutatnak, azaz az elemek önálló viselkedéséből nehezen számítható az önszerveződő kollektív-, rendszerviselkedés.
3. Az emergens viselkedés nem egy központi irányítóból származik.

Tehát végső soron az egész többet fog adni, mint a részrendszerek egyszerű összege.

A decentralizált rendszerek és az emergencia jelenség könnyebb megértésére a Massachusetts Institute of Technology-n fejlesztettek egy StarLogo¹ elnevezésű modellező környezetet, ahol mintaprojektken keresztül van lehetőség a témában történő elmélyülésre. [5]

¹A StarLogo egy ingyenesen, az alábbi elérési útvonalon hozzáférhető freeware szoftver:

<http://education.mit.edu/starlogo/download.html>

3. TÖBBVÁLTOZÓS OPTIMALIZÁLÓ MÓDSZEREK

A többváltozós optimalizálás (más néven is ismert, mint többváltozós programozás, vektoroptimalizálás, többkritériumos optimalizálás, több tulajdonságú optimalizálás és Pareto-optimalizálás) a több feltételes döntéshozatal egy területe, ami olyan matematikai problémákkal foglalkozik, ahol több mint egy változót kell optimalizálni párhuzamosan. A többváltozós optimalizálást több tudományterületen használják, mint a műszaki, a közgazdasági és a logisztikai területen, ahol több, egymásnak ellentmondó paraméter között kell kompromisszumot találni. Egy szerkezeti elem tömegének a csökkentése, míg a teherbírásának a növelése vagy egy jármű teljesítményének növelése, míg a kibocsátásának a csökkentése; mindkét példában ellentmondó paraméterek között kell megtalálni az optimumot. A gyakorlati, komplexebb esetekben több (mint két) paraméter között kell megtalálni a megfelelő állapotot.

Pareto-hatékonyság

Közgazdasági fogalom: amikor egy gazdaságban megváltoztatjuk a javak elosztását a gazdasági szereplők között, úgy hogy legalább az egyik szereplő jólétét növeljük és a többiét nem csökkentjük, akkor Pareto-javítást hajtunk végre. Amennyiben már nem lehetséges Pareto-javítást végrehajtani, akkor a rendszerünk Pareto-hatékony. Több Pareto-hatékony pont is létezhet egy rendszerben. Természetesen komplexebb feladatoknál ha növeljük a változók számát, akkor a Pareto-hatékony pontok száma is növekszik.

Ezek a Pareto-hatékony pontok matematikailag mind egyenrangú megoldások, ám ezek közül a döntéshozónak választania kell. A kutatók különböző nézőpontokból közelítik meg a többváltozós optimalizálás problémáját, így különféle célok léteznek: reprezentatív mennyiségű Pareto-optimum keresése, ami kompromisszumot ad az ellentétes tendenciájú változók között és/vagy egy optimum keresése, ami kielégíti a (humán) döntéshozó igényeit.

A többváltozós optimalizálási problémákra kifejlesztett módszereket négy nagy csoportra lehet osztani: nemalárendeltség elvét alkalmazó, preferencia-orientált megközelítési módok,

utópreferencia-orientált² és az interaktív módszerekre. Az első esetén nem szükséges döntéshozói beavatkozás, az optimumkeresés lezajlik mindenféle preferencia nélkül. Az utóbbi három pedig már igényel döntéshozó beavatkozást a számítás különböző fázisaiban.

3.1. A nemlárendeltség elve

A többváltozós optimalizálási problémák közül azokra alkalmazható, ahol nincsen preferencia-sorrend a különböző szempontok között. A változók fajlagosítása után a probléma visszavezethető egyváltozós optimalizálási problémává.

3.2. Preferencia-orientált megközelítési módok [1]

Ebben az esetben a probléma megoldásához elsőként hatékony prioritási információkra van szükség. Ismert módszerek erre a hasznosság függvény módszer és a lexikografikus módszer és a célprogramozás, amiket a továbbiakban bemutatok. Ezeken kívül ismertek még a

3.2.1. SÚLYOZOTT ÖSSZEG MÓDSZER

A legegyszerűbb és talán a legszélesebb körben használt módszer a súlyozott összeg módszer. A különböző változókat először normalizálni kell, után pedig hozzá lehet rendelni a súlyfaktorokat. Ezt az összeget aztán lehet optimalizálni. Habár az eljárás egyszerű, mégis kicsit ad hoc jellegű, mivel nincsen elfogadott módszer a súlyfaktorok megállapítására, ezek a döntéshozó szubjektív preferenciáit jellemzik.

3.2.2. (FUZZY-LOGIKA)

A Fuzzy-logika alapja, hogy egy állítás nem csak igaz vagy hamis lehet, bináris értelemben 0 vagy 1, hanem részben is lehet igaz vagy hamis. A fuzzy logikában egy állításhoz hozzárendelünk egy 0 és 1 közötti számot, ami az állítás igazsági fokát jelöli: 0 jelenti, hogy hamis, 1 pedig azt, hogy igaz.

² Az angol irodalomban „priori” és „poszteriori” módszerként emlegetik. A „priori” szó jelentése "az előzőekből", a „poszteriori” pedig "a későbbiekből". A két módszer közötti alapvető különbség, hogy a Pareto-pontok meghatározás előtt vagy után viszi be a számításba a döntéshozó igényeit.

Ezeket a hozzárendeléseket elvégezzük a változókra, így a valós értékeket logikai értékekre változtattuk. Ezután a logikai értékekkel dolgozunk tovább, ugyanúgy lehet minimalizálni, vagy maximalizálni, de egyéb szabályokat is beépíthetünk a rendszerbe.

3.2.3. HASZNOSSÁG-ELMÉLET

A hasznosság-elmélet az alapja a döntéselméletnek és egészen Neumannis és Morgensternig nyúlik vissza (1947). A hasznosság függvény egy olyan függvény, ami feltérképezi a változóink értékességét egy skalár formájában. Ezen függvények hozzárendelése a jellemzőkhöz széles interakciót igényel a döntéshozóval. Mindazonáltal szükséges néhány feltételezést tenni ahhoz, hogy az általános hasznosságfüggvényt meg tudjuk határozni: a különböző jellemzők függetlenek egymástól; az aggregált függvény előállításához azt kell feltételeznünk, hogy az egyes jellemzők hasznosságfüggvénye összeadhatók, vagy összeszorozhatók. Az aggregált függvényt maximalizálva megkaphatjuk az optimális állapotot.

A hasznosság-elmélet matematikailag nagyon precíz. Ha megfelelően lettek meghatározva a hasznosságfüggvények és a feltételezések helytállóak, akkor biztos lehetünk abban, hogy a módszer a megfelelő eredményt adja. A buktatók az egyes hasznosságfüggvények meghatározásában vannak, illetve az aggregációban. Sok változó esetén akár kivitelezhetetlen is lehet.

A többi módszer közül számos köthető a hasznosság-elmülethez, mivel próbálnak egyszerűbb módszereket találni a hasznosságfüggvények meghatározásához. Például a súlyozott összeg módszer súlyfaktorai a hasznosságfüggvények lokális gradienseinek tekinthetők.

3.2.4. CÉLPROGRAMOZÁS

A célprogramozásban olyan kritériumok kerülnek kitűzésre, amelyeket a döntéshozó szeretne megvalósítani. A célkitűzéseket különböző módokon lehet megadni:

- nagyobb, mint
- kisebb, mint
- egyenlő
- megadott tartományba eső

Általában a minden igényt kielégítő változat finanszírozás nem kivitelezhető. A célprogramozás feladata, hogy az ideálist legjobban közelítő változatot derítse fel. Azt a verziót, amelyik a legkevésbé tér el a minden igényt kielégítő változattól. A célprogramozás során különböző eljárásokat lehet alkalmazni a „legjobb” megoldás elérése érdekében, mint például a súlyozott összeg módszer, vagy a lexigrafikus módszer.

3.2.5. LEXIKOGRAFIKUS

A lexikografikus megközelítésnél a döntéshozó meghatározza, hogy a változók milyen sorrendben kerüljenek optimalizálásra. Mint az ABC-ben az A betű megelőzi a B-t, ebben az esetben is van egy szigorú sorrend, ami szerint történik az optimalizálás. Amennyiben egy változóra több optimum adódik, akkor folytatódik az optimum keresés alacsonyabb szinteken a soron következő változónál, ameddig meg nem lehet határozni a megoldást. A hátránya ennek a megközelítésnek, hogy lehet, hogy nem minden változót vettünk figyelembe. Önmagában nem gyakran használják a mérnöki gyakorlatban ezt a módszert, inkább kombinálják más technikákkal, mint a célprogramozás, vagy a genetikus algoritmusok egy kiválasztási mechanizmusaként.

3.2.6. TÖBBVÁLTOZÓS GENETIKUS ALGORITMUSOK

A genetikus algoritmusok olyan speciális evolúciós algoritmusok, amelyek technikáját az evolúcióbiológiából vették. Ezekkel a keresési technikákkal optimumot vagy adott tulajdonságú elemet lehet keresni. A keresési tér elemeit legegyszerűbben véletlenszerűen lehet generálni, azonban ha van egy sejtés, hogy milyen elemek közül ki az eredmény, akkor a folyamat felgyorsítása érdekében több elemet lehet felvenni arra a részre. Ezek az elemek lesznek a populáció egyedei.

Az egyedekből újabb egyedeket kétoperandusú keresztezéssel (vagy rekombinációval) vagy egyoperandusú mutációval lehet létrehozni. A keresési téren értelmezzük a célfüggvényt, vagy más néven a fitness függvényt. Ez lesz a kiválasztás alapja, ami kétféle lehet: sztochasztikus vagy determinisztikus. A sztochasztikus kiválasztás a népszerűbb, mivel bár megmaradnak az adott feltételnek nem megfelelő egyedek is, azonban ezzel elkerülhető a lokális optimumhoz való konvergencia. A determinisztikus esetén pedig teljesen kiesnek a bizonyos fitness érték alatti egyedek.

Az ilyen szaporító és kiválasztó lépések során keletkező generációk sora konvergál az optimumhoz. A folyamat leállása általában akkor következik be, amikor egy leállási feltétel teljesül. Ez lehet egy generációs szám elérése, vagy például az, ha a legjobb fitness értékkel rendelkező egyed értéke már nem változik jelentősen az iterációs lépések során.

3.3. Utópreferencia-orientált módszer

A módszer lényege, hogy meghatározzuk a Pareto-hatékony állapotokat, amelyek közül utólag választunk. Tehát a feltételeinket a Pareto-hatékony pontok megkeresése után visszük be. Sokváltozós problémánál számos ilyen pontunk adódhat, amelyek közül nem feltétlen egyértelmű a választás a döntéshozó számára. Ennek a módszernek az előnye, hogy döntési alternatívákat lehet kínálni a döntéshozó számára és az elemzést elég egyszer elvégezni a döntési folyamat során, amennyiben a probléma peremfeltételei nem változnak. Azonban ha túl sok ilyen pont adódik, akkor átláthatatlanná válik a helyzet. Ebben az esetben ábrázolni lehet a Pareto-hatékony pontokat.

3.4. Interaktív módszer

Az interaktív módszer esetén egy matematikai iterációs kiválasztási folyamat zajlik, ahol a döntéshozó folyamatosan beavatkozik az iterációs lépéseknél a keresés alatt. Más szavakkal a döntéshozótól azt várjuk, hogy az iterációs lépéseknél kijelölje a preferenciáját, hogy merre folyjon tovább az iteráció. Mindez annak érdekében, hogy a döntéshozó igényeihez legközelebb álló Pareto-hatékony pont kerüljön kiválasztásra. A folyamat általában az alábbi lépésekre osztható:

1. inicializálás (egy ideális és ahhoz közel eső legalacsonyabb objektív verziók bemutatása a döntéshozónak)
2. egy kiindulási Pareto-pont generálása (egy nemlárendelt módszerrel vagy a döntéshozó által megadott verzióra)
3. preferencia információ kérése a döntéshozótól
4. új Pareto-hatékony pont generálása a megadott feltételekkel és lehetőség szerint több információ megadása az állapotról a döntéshozó számára
5. ha több megoldás adódott, akkor a döntéshozót megkérni, hogy válasszon ezek közül

6. iteráció befejezése, ha a döntéshozó elégedett az eredménnyel; ha nem, akkor visszalépés a 3. pontra.

A fentiek szerint a teljes matematikai konvergencia helyett egy úgynevezett pszichológiai konvergencia jelenik meg, miszerint a döntéshozó leállítja a műveletet, ha már biztos abban hogy elérte a megfelelő állapotot a számítás (Például: az újabb körök már csak elhanyagolható mértékben változtatják az eredményt). Ezzel a módszerrel fölösleges számításokat lehet megtakarítani, azonban folyamatos jelenlétre van szükség a döntéshozó részéről.

3.5. Hibrid módszerek

A hibrid módszerek gyakorlatilag több módszert ötvöznek a fentebb említettek közül. Céljuk ezzel az, hogy egy összetett problémát különféle megközelítések segítségével hatékonyabban tudjanak feldolgozni és a végső eredményt közelebb tudják hozni a döntéshozó igényeihez.

4. LÉTEZŐ VILÁG- ÉS ENERGETIKAI MODELLEK

Különböző céllal számos modell készült már összetett rendszerekről. Ezeknek a skálája a világmodellektől egészen a kis, regionális specifikus modellekig húzódik. A tervezési szintektől függően változik a bonyolultsági foka is ezeknek, annak függvényében, hogy milyen céllal alkották meg őket. Ebben a fejezetben először ismertetek néhány létező világ- és energetikai modellt, amely során képet kaphatunk a modellek széles felhasználási skálájáról. Az utolsó két példa pedig már specifikusan a magyar energetikai rendszerrel foglalkozik.

4.1. *World3 modell*

A World3 egyik a számos létező világmodellnek, amit 1972-ben alkotott meg Donella Meadows, Dennis Meadows and Jorgen Randers a Római Klub felkérésére. A modellt számítógépes szimuláció³ futtatására használták, az eredményeket pedig a *Növekedés határai* című műben publikálták, ami nagy port kavart és későbbiekben számos kritikát is kapott.

A modell felépítése szempontjából számos kölcsönható alrendszerrel működik, amelyek önálló modellként is megállnák a helyüket. A fő alrendszerek az élelmiszer- (agrárgazdaság és élelmiszertermelés), ipari-, népesség-, nem megújuló erőforrások-, szennyezési rendszerek. A vészjósló előrejelzések már 40 év távlatából látva nem állják meg a helyüket. Azonban a főbb kritikákat nem a modell minőségi felépítésére és kapcsolati láncolataira és visszacsatolási mechanizmusaira kapta, hanem a mennyiségi feltételezésekre. Több szempontból (GDP, élelmiszertermelésre használt földterület, stb.) konstans növekedési ütemet és extenzív fejlődést feltételezett, a minőségi, intenzív fejlődéssel nem számolt. Mindenesetre a modell alkotása óta megélt még három frissítést (1991, 2000, 2004), amelyekből új magyar nyelven is elérhető könyvkiadások születtek, melyek közül a legfrissebb a *„A növekedés határai - harminc év múltán”*.

³ A World3 modell szimulációja elérhető a <http://insightmaker.com/insight/1954> oldalon.

4.2. MARKAL modell

Az International Energy Agency (IEA) nemzetközi ETSAP (Energy Technology Systems Analysis Programme) programjának majd két évtizedes munkája által fejlesztett MARKAL (MARket ALlocation) modell egy általános, energetikai rendszerek nemzeti regionális, lokális modellezésére és gazdasági elemzésére használható lineáris program. Az adatbázisa megadja modellezendő évtizedekben fellépő ipar, szolgáltatás, háztartások és közlekedés igényeit. Leírja a rendelkezésre álló nyersanyagok elérési lehetőségeit és az elérhető technológiákat is. A beépített korlátozások mellett (például erőművi kapacitások építési sebessége és mértéke) lineáris összefüggésekből eredményül adja a gazdaságilag optimális erőműparkot az időszakra.

A MARKAL modell lineáris egyenletekből és egyenlőtlenségekből dolgozó dinamikai modell, amely eredményül tudja adni a gazdaságilag optimális erőmű portfóliót az adott igények és korlátozások figyelembevételével, azonban a modell mentes a visszacsatolásoktól és visszahatásoktól. Ennek eredményeképpen elég merev modellt kapunk, ami az előre specifikált adatbázisból dolgozik.

4.3. World Energy Model

Az IEA nemzetközi statisztikájára alapozva készíti a World Energy Model-t, ami az energetikai szektorral kapcsolatos piacok viselkedését hivatott leírni. Ezt folyamatosan frissítik az aktuális statisztikai adataikkal, és évente kiadnak a modell eredményeiből összeállított World Energy Outlook-ot.

Szerkezetileg az egyes modulok reprezentálják a különböző piacokat és ezek kölcsönhatásaiból kiindulva állították fel a matematikai modellt. A visszamenőleges statisztikai adatok jelentik a modell számára az inputot a szimulációk során.

4.4. Több szempontú értékelési rendszer [6]

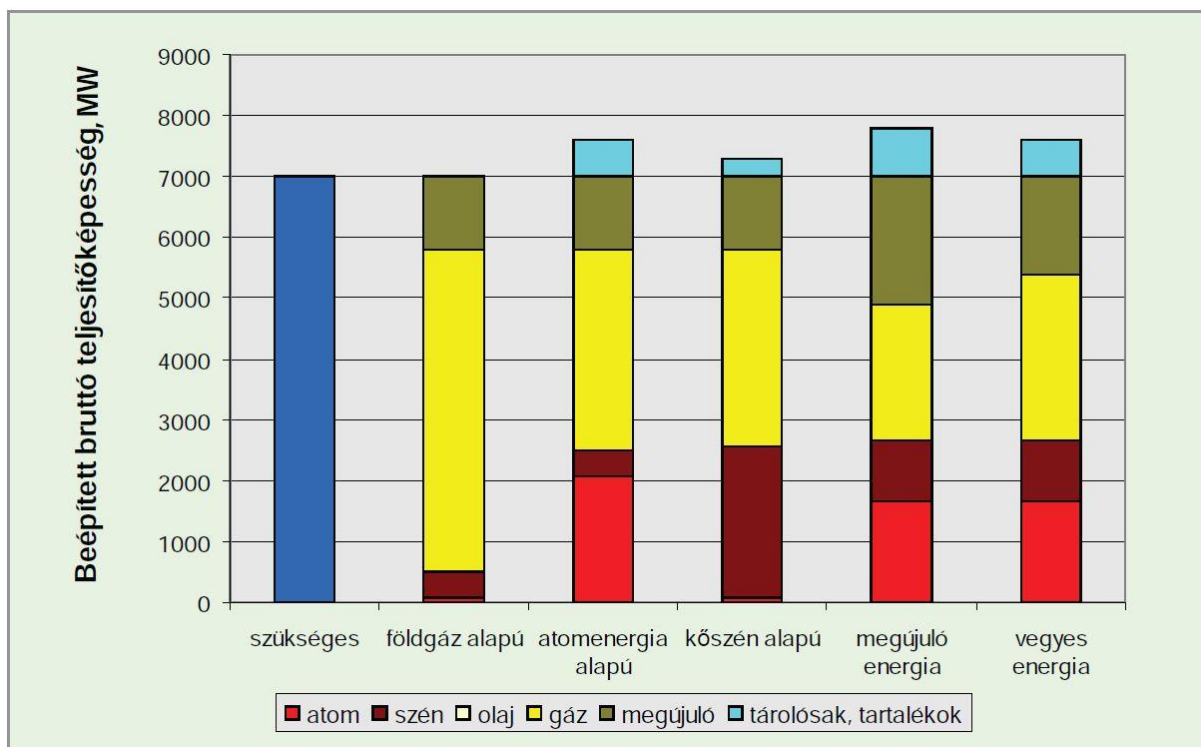
A Magyar Energetikában megjelent „Több szempontú döntési modell alkalmazása a hazai villamosenergia-termelési rendszer fejlesztésében” című munkában a primer energiaforrás szerint eltérő forgatókönyvek összehasonlítására vállalkoztak a szerzők több szempontú döntési modell (Multi-Criteria Decision Analysis; MCDA) alkalmazásával.

A cikk elején a jelenlegi erőműpark fejlesztésének szükségességéről írnak. Illetve taglalják az MCDA előnyeit, miszerint integrálni képes a gazdasági, környezeti és társadalmi szempontokat. Hazai viszonylatban ilyen jellegű munka még nem készült, különböző scenáriók széleskörű összehasonlítására még csak nemzetközi porondon került sor. Mindazonáltal ez egy fontos feladat, mivel a szereplők csak a saját érdeküket tükröző szempontrendszer szerint viselkednek. A döntéshozóknak viszont mindegyiket figyelembe kell venni.

„...a rendszerirányítás szakértői a forgatókönyvek vázolásánál megállnak, és az irány kijelölését a piacra hagyják. A befektetők főként gazdasági szempontokat mérlegelnek, míg a társadalmat elsősorban a környezeti és élettani hatások foglalkoztatják.”

4.4.1. AZ ÖT VÁLTOZAT

A tanulmány alapja az ERŐTERV által készített, hálózatiirányítási szempontoknak megfelelő öt scenárió, melyek közül az első négy az ésszerűség határáig növelt földgáz, atom, szén és megújuló energiaforrások részesedését tekinti kiindulópontnak, míg az ötödik egy arányosan elosztott mixet vesz alapul. (3-1. ábra)



4-1. ábra. Az ERŐTERV által összeállított öt scenárióhoz tartozó beépített bruttó teljesítőképesség primer energiahordozók szerinti részaránya a várható erőmű-leállások pótlására [6]

A különböző változatok esetében a beruházások minden esetben a jelenleg elérhető legkorszerűbb technológiákat alkalmazza, földgáz esetén kombinált ciklusú gázturbinás (CCGT), atomenergia esetén 3. generációs nyomottvizes PWR, a harmadik esetben kőszénrel integrált elgázosítású kombinált ciklusú (IGCC) erőművek adataival dolgoztak. A 7000 MW szükséges bruttó teljesítmény feletti rész a tartalékképzésből fakadó kényszer beruházásokat jelöli.

Az első változatnál a földgáztüzelésű erőművek rugalmasságából adódóan nincs szükség többletberuházásra a szabályozhatóság érdekében. A második esetben az atomerőműhöz már 600 MW tárolókapacitás építésére van szükség. Ez a kapacitás a megújulós verziónál a legdominánsabb, ezeket mindegyik esetben szivattyús energiatároló adataival dolgoztak. A negyedik szén alapú verzió esetén nem csak a hazai lignitvagyonra, hanem import szénre is alapozták a számításokat. Az ötödik, vegyes változat az atomos koncepcióhoz áll a legközelebb, csak egy kicsit nagyobb a szén szerepe az atomenergia rovására.

A megújuló részarányon belül a termelés kisebb részegységei között oszlik meg. Ezeknek a kisebb egységeknek a részarányai három különböző becslést vettek figyelembe, amelyet 3-1. táblázat tartalmaz, az 5% alatti részesedésű elemeket az egyszerűség kedvéért figyelmen kívül hagyták.

4—1. táblázat. Három becslés a megújuló energiát hasznosító, újtelepítésű erőművek beépített teljesítményének százalékos részarányára [6]

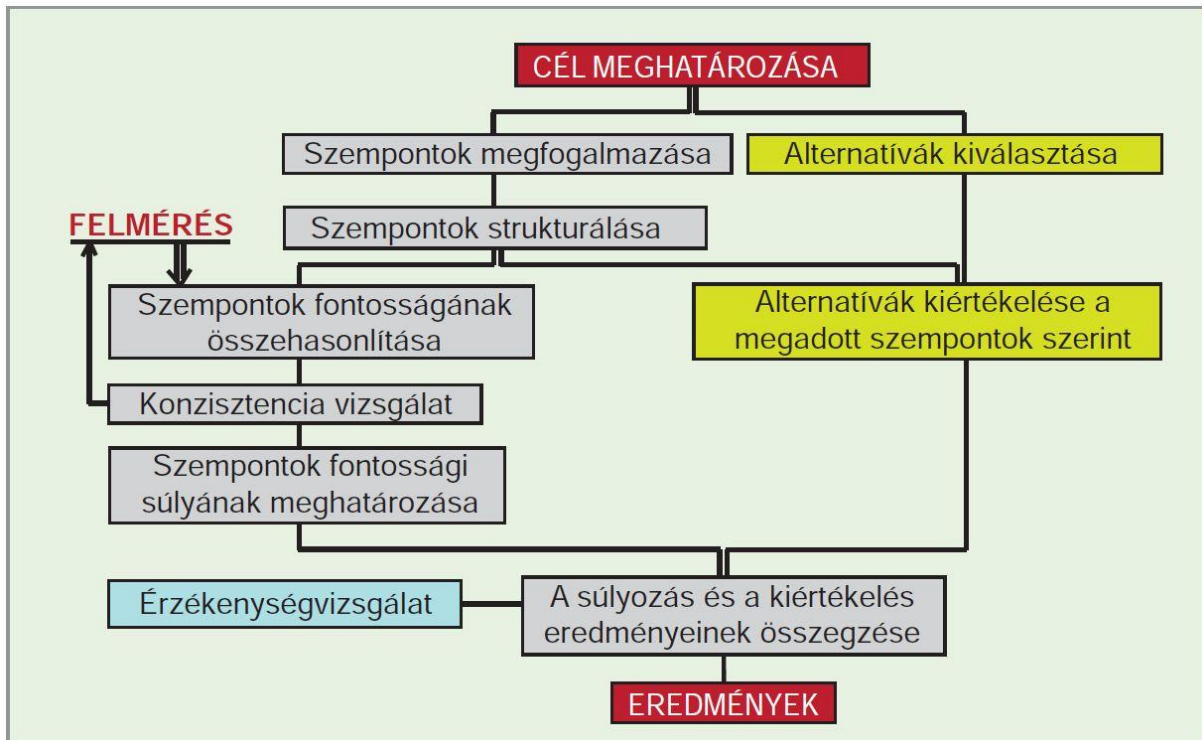
	biotermikus	szél	víz	foto-villamos
MAVIR	37,77	57,14	3,80	1,26
ERŐTERV				
MEH-PYLON	23,38	56,48	5,18	14,94
REPAP	48,50	33,98	10,58	6,91

A 15 lehetőség közül (5 alap szcenárió, mindegyik 3-szor a megújuló variációk miatt) a választásra számos pro és kontra érvet lehet felhozni. Például az atomerők baleseti kockázataira, a földgázból fakadó importfüggőségre, a szén blokkok klímahatására vagy a megújuló energiásűrűségéből fakadó problémákra. Ezeket a szempontokat nem egymástól elszigetelten, hanem egy tudományosan kiválasztott szempontrendszer szerint együtt érdemes vizsgálni. Erre nyújtanak eszközrendszert a több szempontú döntési modellek (MCDA).

4.4.2. A CIKKBEN HASZNÁLT DÖNTÉSI MODELL

A cikkben használt MCDA módszer sajátossága, hogy az összeállított szempontrendszer minden pontja alapján értékeli, ezeket összesítik és az eredményt alapján választják ki az igényeknek leginkább megfelelő változatot. Az értékelési szempontoknak jól és redundancia nélkül kell leírnia az igényeket, hogy a többszörös hatásokat elkerüljük.

Az MCDA-AHP (Analytic Hierarchy Process) minden lépésénél számszerűsít (3-2. ábra), ezek visszatekinthetőek, ezzel a döntési folyamat lépései is láthatóvá válnak, ami fontos szempont, mivel az értékelés eredménye mellett fontos, hogy világos legyenek a részeredmények is, és áttekinthető legyen a folyamat.



4-2. ábra. Az MCDA-AHP (Multi-Criteria Decision Analysis Analytic Hierarchy Process) módszer legfontosabb lépései [6]

4.4.3. A FELHASZNÁLT SZEMPONTRENDSZER A CIKK ALAPJÁN

„Az értékeléshez használt szempontrendszer fölállításának kiindulópontja a 2001-es fenntartható fejlődés energetikai indikátorait összefoglaló nemzetközi felmérés 38 szempontja volt, amit a PSI 2006-ban publikált munkájában a több szempontú döntési modellhez igazított. Az így kapott 18 szempont egyszerűsített (kompaktabb) formában, redundancia nélkül írja le a villamosenergia-termelés gazdasági, környezeti és társadalmi nézőpontjait. Ebből 15 szempontot használva hasonlítottuk össze a legfontosabb energiatermelési módokat, majd értékeltük a forgatókönyveket (3-2. táblázat). A fölhasznált szempontoknál alapvető elvárás volt, hogy mindegyikhez létezzen olyan tudományos pontossággal mérhető mennyiség (indikátor), mely alapján különböző erőműfajták összehasonlíthatók.

4—2. táblázat. Az energiatermelési lehetőségek összehasonlításához használt szempontrendszer [6]

Fő szempontok	Szempontok	Indikátorok (egység)
gazdaság	Előállítási költség	Fajlagos előállítási költség, c€/kWh
	Beruházási költség	Fajlagos beruházási költség, €/MWh
	Energiahordozó árára való érzékenység	Előállítási költség növekedése az üzemanyag árának megduplázódásakor, faktor
	Hosszú távú fenntarthatóság	Feltárt készletek mennyisége, év
	Geopolitikai tényezők	Üzemanyag-beszerzési lehetőségek, relatív skála
környezet	Klímahatás	Üvegházhatású gázok fajlagos kibocsátása, gCO ₂ -eq/kWh
	Teljes hulladék	Fajlagos hulladéktérfogát, m ³ /kWh
	Súlyos balesetek	Fajlagos baleseti halálozás, haláleset/kWh
	Természeti környezetre gyakorolt hatás	Biodiverzitás-csökkenés, ⁴ PDF/kWh, c€/kWh
	Épített környezetre gyakorolt hatás	Épületkár, m ² /kWh, c€/kWh
társadalom	Egészségi hatások	Mortalitás, ⁵ YOLL/kWh, c€/kWh
	Kockázatelutasítás	Baleset súlyossága (max. haláleset/baleset)
	Kritikus hulladéktárolási idő	év
	Foglalkoztatás	Fajlagos foglalkoztatás, munkahely/kWh
	Helyi zavaró hatások (zaj, területfoglalás, tájképrombolás)	Relatív skála

Az erőműtípusok indikátorértékeinek meghatározásához egységesen, a 2009-ben lezárult NEEDS és CASES projekt teljes életciklusra vonatkozó eredményeit használtuk föl a legfontosabb gazdasági, környezeti és az egészségi szempontok esetén. A balesetek értékelésénél megkülönböztettük a valós baleseti kockázatot (súlyos baleset), amit az ENSAD

⁴ PDF - a potenciálisan eltűnt és az eredeti fajok számának aránya

⁵ YOLL - elveszett életévek száma

adattáza alapján 1970-től az energiatermelés során bekövetkezett, teljes életciklusra számított balesetek halálos áldozatainak kWh-ra vetített számával mértünk, és a balesettől való félelmet (kockázatelutasítás), amit minden egyes alternatívánál a lehetséges legtöbb emberéletet követelő, tervezésen túli baleseti esemény (baleset valószínűsége $<10^{-8}$) veszteségeivel vettük figyelembe. ”

Az indikátorok mértékegységei eltérők, azonban az adott egységek kellően eltértek ahhoz, hogy egy 0-tól 100-ig terjedő skálán az egyes szempont szerinti legkedvezőbb erőműtípus kapjon 100-at, míg a legkedvezőtlenebb 0-t. A köztes értékeket pedig normalizálással vették fel. Így teljesen homogén módon tudták kezelni a szempontrendszert, azonban nyilván nem egyenlő súllyal szerepelnek a későbbi elemzésben.

A szempontok súlyozását az MCDA modellek közül az Analytic Hierarchy Process (AHP) eljárást alkalmazva oldották meg. Az eljárás részletes kifejtését ebben a munkában nem ejtem meg, csak annyit emelnék ki belőle, hogy az eljárás alapja kérdőíveztetés.

A súlyozott összeg módszerét alkalmazva az eljárás a nem tüzelésen alapuló megújuló energiaforrások fölényes győzelmét adta. A magas beruházási költség eltölpül a kérdőíveztetés hatására nagy súllyal szereplő környezeti és élettani hatások mellett. Ugyanez a sorolja a mezőny végére a fosszilis tüzelésű erőműtípusokat. A két véglet között körülbelül félúton helyezkedett el az atomenergia.

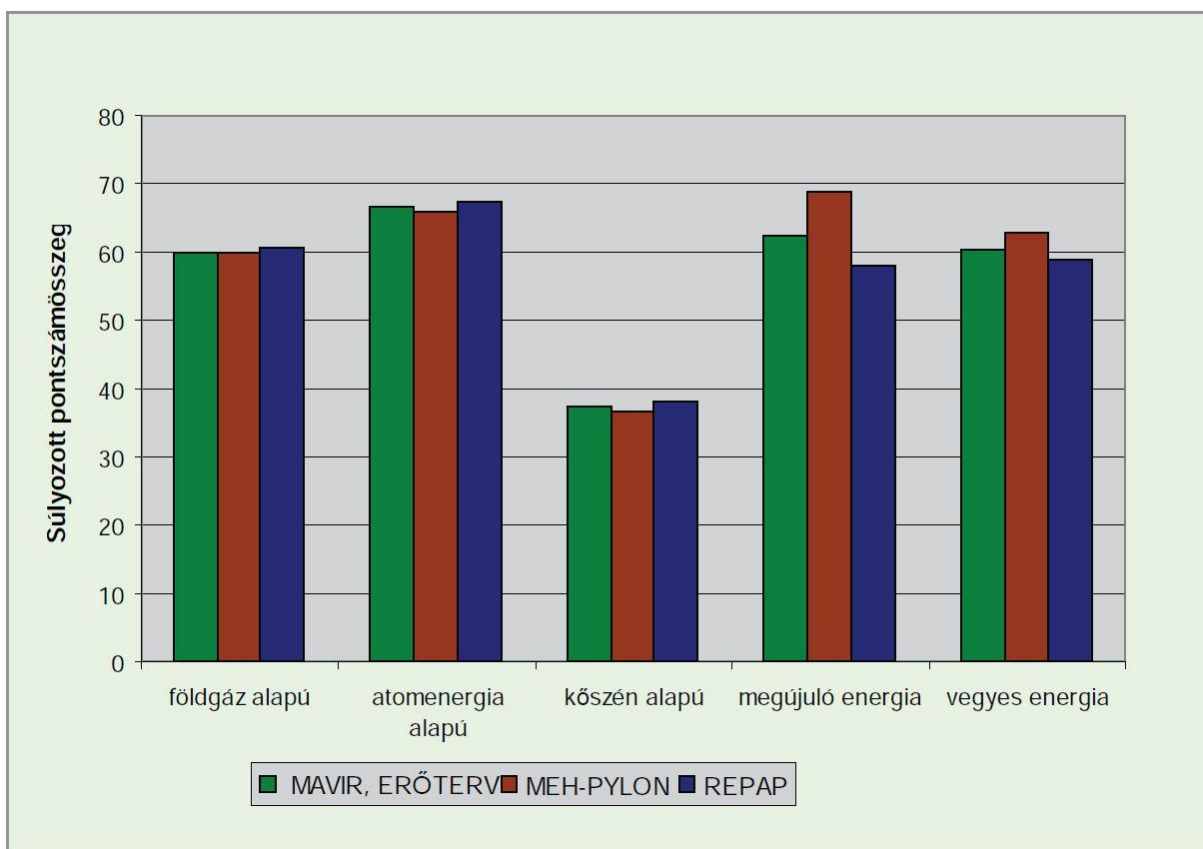
Mivel az indikátorok a termelt villamos energiára vannak vonatkoztatva, ezért az egyes szcenáriókban felvázolt erőműtípusokhoz rendelt beépített teljesítményekhez még hozzá kell rendelni a kihasználási óraszámokat, amiket a munkában a MAVIR-ERŐTERV becslését vették alapul. (3-3. táblázat)

4—3. táblázat. A hazai erőművek éves
kihasználása a MAVIR-ERŐTERV
becslésének felső határát véve alapul [6]

Erőműtípus	Éves kihasználási óraszám, h/év
nukleáris	7884
lignit	7008
kőszén	4380
földgáz	3942
biomassza	5256
víz	4000
szél	2190
szivattyús tározó	700,8
fotovillamos	1051,2

4.4.4. AZ EREDMÉNY

A különböző változatok értékelése az egyes erőműtípusok által termelt villamos energiához tartozó súlyozott indikátorösszegei adták. A forgatókönyvek eredményei összhangban vannak az erőmű alternatívák értékelésével. Az eredményeket a 3-3. ábra mutatja. Egyértelműen adódik, hogy a széntüzelésű scenárió a fentebb említett okok miatt a legalacsonyabb pontszámmal rendelkezik.



4-3. ábra. Öt primerenergia-mixre vonatkozó scenárió értékelése, három megújuló részarány-becsléssel [6]

Az eredményeket a cikkben az alábbiak szerint értékelték:

„A földgáztüzelést favorizáló scenárió pozícióját a szerényebb környezetterhelés és a tározó többletköltségének hiánya jelentősen javítja, azonban még így is csak a REPAP-féle magas biotermikus részarány esetén képes a megújuló energiára építő scenárió második helyét elfoglalni. A legmagasabb pontszámot pedig a kiemelkedő atomenergia-részaránnal rendelkező forgatókönyv kapta, mely még tárolókapacitás kialakításával is versenyképes. Az utóbbi komoly vetélytársa a megújuló energiaforrásokra építő forgatókönyv, mely a MEH-Pylon becslésnél a magas fotovillamos hányadnak köszönhetően meg is előzi az atomenergia-alapú scenárióét.”

Számomra a legmeglepőbb az a tény, hogy a szenes verzió egyértelmű lemaradásától eltekintve a különböző scenáriók pontszámai igen szoros végeredményt mutatnak.

4.5. Többváltozós energiamix optimalizálás [12]

Dr. Kádár Péter cikkében egyváltozós optimalizáláson keresztül mutatja be, hogy tudományos alapú energiamix optimalizálásra alkalmasak lehetnek a többváltozós optimalizáló eljárások.

A cikk alapvetően három esetet vizsgál:

- a legalacsonyabb költségű portfólió
- a legalacsonyabb CO₂-kibocsátású portfólió
- a legalacsonyabb externális költségű portfólió

A legalacsonyabb költségű változat igényli a legkisebb jelenlegi terhet, azonban nincs figyelembe véve a környezetterhelés. A CO₂-kibocsátást viszonylag egzakt módon meg lehet határozni. Az externális költségek azokat a költségeket veszi figyelembe, amelyek jelen esetben az erőművi villamosenergia-termelésből adódnak, azonban nem a termelőnél és fogyasztónál lépnek fel, hanem másik szereplőnél. Az ilyen externális költségek meghatározása igen nehéz feladat, azonban vannak projektet, amelyek ezekkel foglalkoznak:

- EU ExternE projekt
- NEEDS konzorcium (New Energy Externalities Development for Sustainability)
- USA NSA projekt „Hidden Cost of Energy”
- német BMU projekt „Externe Kosten der Stromerzeugung” projekt

4.5.1. OPTIMALIZÁLÁS

A jövőbeni energiastratégia és energiamix meghatározása többváltozós probléma, azonban a demonstrálásra egyváltozós eljárást alkalmaz. A rögzített értékek:

- a jelenlegi erőműpark
- növekedési lehetőségek
- éves energiaigény (a jelenlegi 40 TWh-ról 2020-ra 50 TWh)
- kihasználási tényező
- maximum villamosenergia-termelés
- minimum villamosenergia-termelés
- externális költségek/MWh

- CO₂-kibocsátás/MWh
- beruházási költség
- élettartam

Egyváltozós optimalizálás történt a fejezet elején említett három esetre, 13%-os megújuló részarány megkötéssel és anélkül. A minimalizáló függvény megadása után a korlátokat kell megadni, amelyek a rögzített értékekből adódnak.

4.5.2. EREDMÉNYEK

- a módszertan alkalmas a stratégia kvalitatív meghatározására
- az energiamix egy többváltozós problémakör
- a politikai döntések helyett numerikus módszerek használhatók
- a jövőbeni energiamix érzéketlen a termelt villamos energia mennyiségére
- nem javasolt energetikai monokultúra kiépítése
- az alacsony költségű esetben a jövőbeni működési költségek az egekbe szöknek
- az erőmű építési és működési költségek az externális költségek nagyságrendjébe esik

4.5.3. KONKLÚZIÓ

- a CO₂-kibocsátás és az externális költségek minimalizálása a javasolt változat
- az egyszerű költségminimalizáló változat nagy mennyiségű CO₂-kibocsátást eredményez
- a gáztüzelésű rendszer olcsó, de CO₂-kibocsátó
- a szélenergia üdvözölt
- mindegyik portfólió tartalmaz vízerőművet
- a centralizált nagy mennyiségű biomassza tüzelés nem eleme az optimális energiamixnek
- mindegyik alternatíva tartalmaz nukleáris villamosenergia-termelést

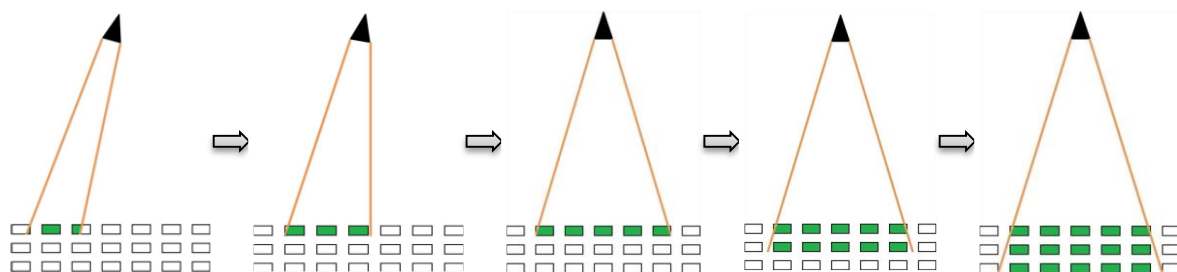
5. MODELL FELÉPÍTÉSE ÉS JELLEMZŐI

A modellezés eszközeit több céllal lehet használni, vagy egy modell építésére és az elkészült modellel szimulációkon keresztül különböző scenáriók felállítására, vagy szubjektív scenáriók értékelésére.

A modellépítés első lépéseként definiálni kell a modell célját és annak függvényében lehet körülhatárolni és beazonosítani az alrendszerait és funkciójukat. A modell akkor jó, ha minél egyszerűbb, tehát, csak a számunkra releváns kapcsolatokat érdemes beépíteni, nem szabad túlbonyolítani a rendszert fölöslegesen. Szimuláció esetén viszont előnyös, ha minél részletesebb eredményt tudunk kapni, a kettő nem összekeverendő.

A modellem építésénél kitűzött cél, hogy egy fizikailag jól körülhatárolható energetikai rendszer (pl. egy ország) forrás oldali energiamixét számolható legyen a megadott korlátozó feltételek mellett (pl. földrajzi adottságok), több szempont szerinti objektív optimalizálás során.

A feladat kellően összetett volta miatt részfeladatokra és lépésekre osztottam az építés folyamatát. Ennek megfelelően egyesítve a 2. fejezetben említett szemléletmódokat először egy részére fókuszálok a kérdéskörnek. Amikor sikeresen felírtam az alapvető, még lineáris működését az alrendszernek, akkor horizontálisan bővíttem a rendszeremet addig, amíg el nem értem a kívánt terjedelmét. Végül pedig a felállított alapokból kiindulva mélyítettem az egyes részrendszerek közötti kapcsolatokat és összefüggésemet, amíg a szimulációk el nem érik a kívánt pontosságot (5-1. ábra). Jelen munkában a modell alapjait rakom le, illetve bemutatom a bővítési módszertanát.



5-1. ábra. Szemlélet bővítése a modellépítés során

5.1. A modell szerkezete

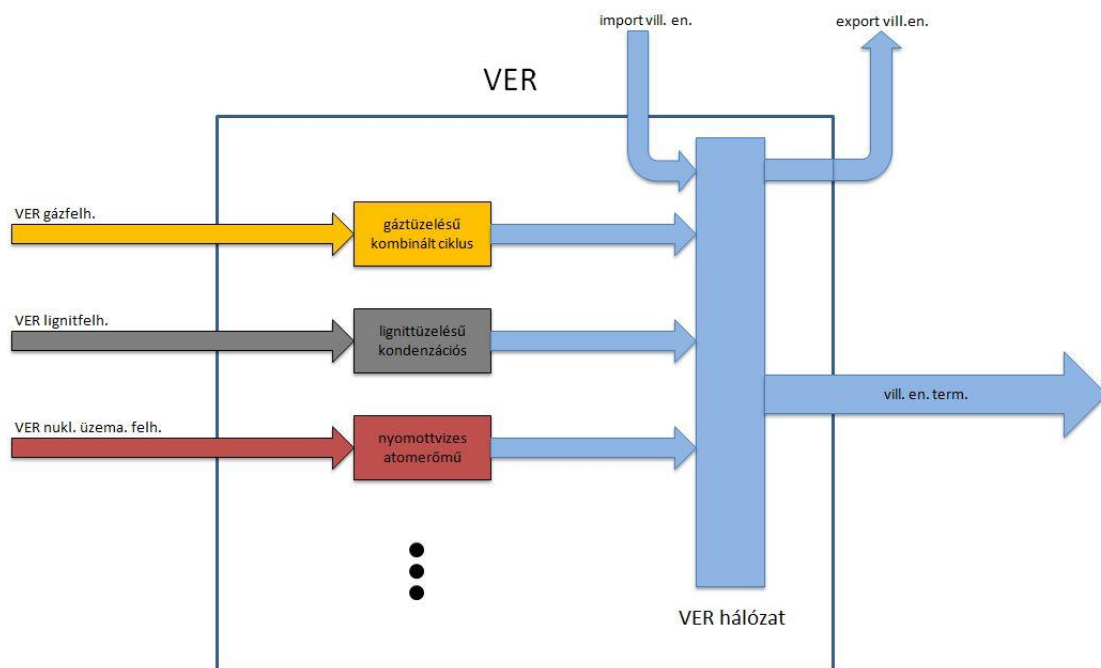
Első lépésként a villamosenergia-rendszert vettem górcső alá. Vizsgáltam a rendszerkapcsolatokat a primer energiafelhasználás és villamosenergia-termelés szempontjából. Magyarország erőműparkjából kiindulva arra az egyszerűsítésre jutottam, hogy minden primer energiaáramhoz egy technológiai részrendszer rendelése a modellépítés első fázisban elegendő. Ennek megfelelően az 5-1. táblázat szerinti technológiai részrendszereket vettem fel a táblázatban látható jellemző paraméterekkel.

5—1. táblázat. Technológiai alrendszerek

Technológiák	Tüzelőanyag	Hatásfok, %
Kondenzációs erőmű	Lignit	32%
Kombinált ciklusú erőmű	Földgáz	50%
Nyomottvizes atomerőmű	Nukleáris üzemanyag	33%*
Biomassza-tüzelésű erőmű	Biomassza	30%
Naperőmű	-	100%*
Szélerőmű	-	100%*
Vízerőmű	-	100%*
Hulladék-tüzelésű erőmű	Hulladék	30%
Import-export szaldó	-	100%

* egyezményes hatásfokok

Az 5-2. ábra mutatja a villamosenergia-rendszer egyszerűsített felépítését. Ami a rendszerkapcsolatok szempontjából kiemelendő, hogy az egyes technológiai részrendszerek által termelt villamos energia és az import villamos energia összegződik a VER hálózaton, innentől kezdve pedig nem követhető az előélet, azaz, hogy milyen típusú erőműben termelték.



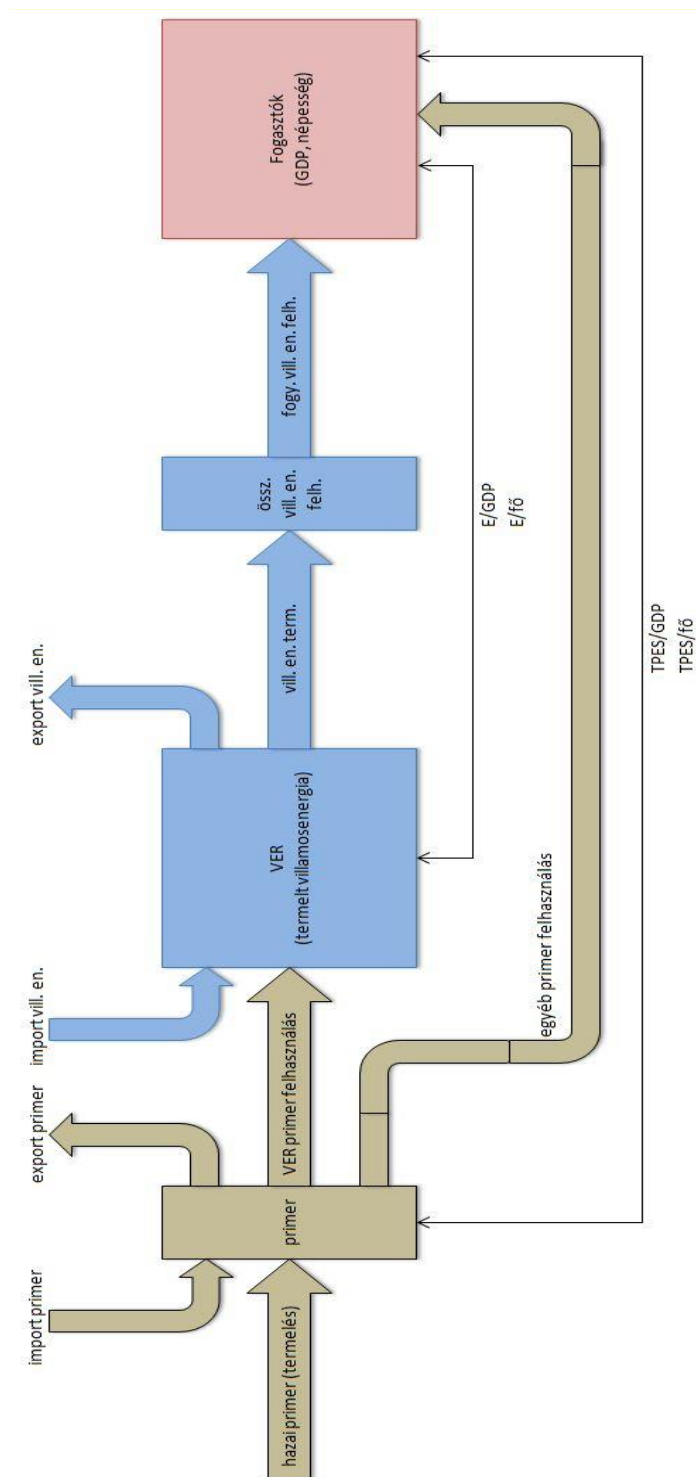
5-2. ábra. VER folyamatára

A szűk villamosenergia-rendszer tárgyalását követően, szükséges a tágabb környezet modellezése, aminek az áttekintő képét az 5-3. ábra adja. Látható, hogy következő lépésben mindkét irányban bővítettem a rendszert. Először összevontam a villamosenergia-alrendszerbe érkező primer energiahordozókat, amelyeket innentől kezdve az átláthatóság kedvéért egyben fogok kezelni. Ez természetesen nem jelenti azt, hogy a számítások során is össze lennének vonva, csupán azt, hogy a párhuzamosan futó ágakat így könnyebb kezelni.

A VER kilépő oldalán megjelentek a fogyasztók, mint új alrendszer. A fogyasztói alrendszerbe érkezik a megtermelt villamos energia a VER-ből, illetve a primer energiahordozók nagyobbik része. Ebben a felbontásban fogyasztónak minősül minden, ami villamos energiát vagy primer energiát használ - a Magyarország-példánál maradva, gyakorlatilag minden és mindenki az országban, akinek az energiaigényét ki kell elégíteni. Az export-import természetesen megjelenik a primer- és a VER-oldalon is.

Végző soron az a célunk, hogy a modell magától számolja az egyes mennyiségeket, ehhez pedig szükség van az egyes alrendszerek közötti összefüggések feltárására. Első lépésként visszamenőleg lehetőség van arra, hogy a rendszert feltöltsük évek statisztikai adataival és ezek

alapján definiáljuk az összefüggéseket az egyes alrendszerek és mennyiségek között. Ezek az *energetikai mutatók* lesznek később a modell működésének alapjai.

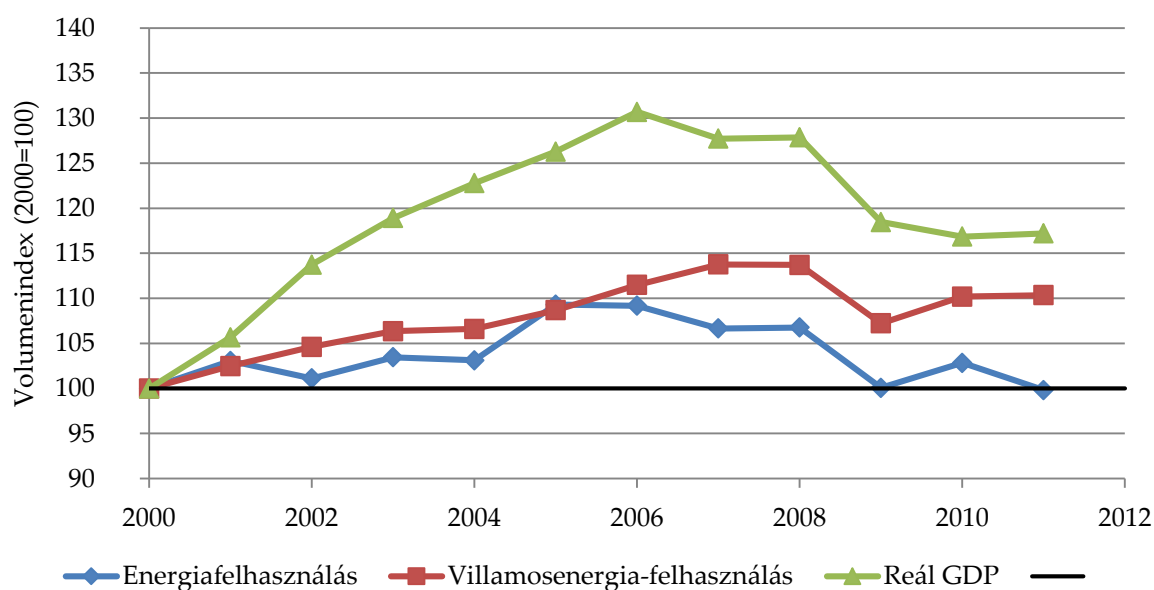


5-3. ábra. A modell folyamatábrája

5.2. Energetikai mutatók⁶

A rendszerben alapvető mennyiségi mutatóként jelenik meg a teljes primer energiafelhasználás, a villamosenergia-felhasználás, a GDP és a népesség. Magyarország adatait alapul véve vizsgálom ezek változását és egymáshoz való viszonyait a fejezetben, hogy a későbbiekben a levont tapasztalatokból fel lehessen állítani a modell számára a viszonyrendszert.

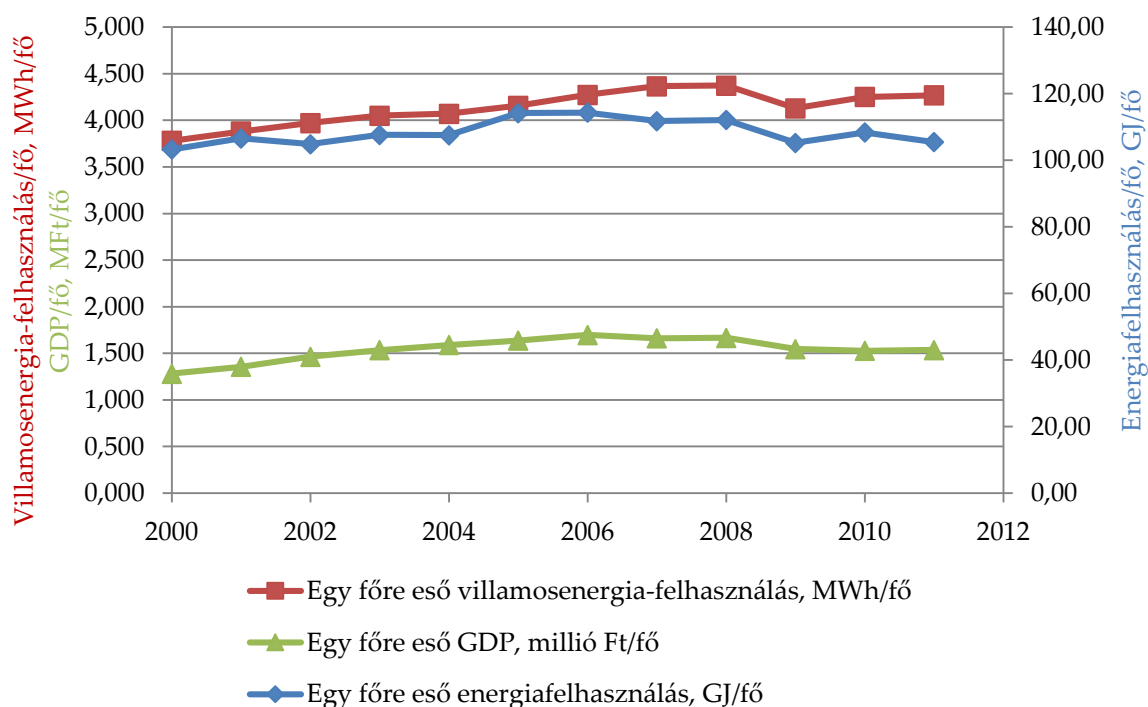
Az 5-1. diagram a teljes primer energiafelhasználás, villamosenergia-felhasználás és reál GDP volumenindexeit mutatja a 2000. év bázisán. A 2000-es évek tartós növekedési ütemét egyértelműen megtöri a 2008-ban kirobbant gazdasági világválság, azonban már 2007-ben is csökkent a reál GDP értéke Magyarországon. Ezt a megtorpanást és visszaesést jól láthatóan követi a primer energia- és villamosenergia-felhasználás mértéke is.



5-1. diagram. TPES, E és GDP volumenindexek

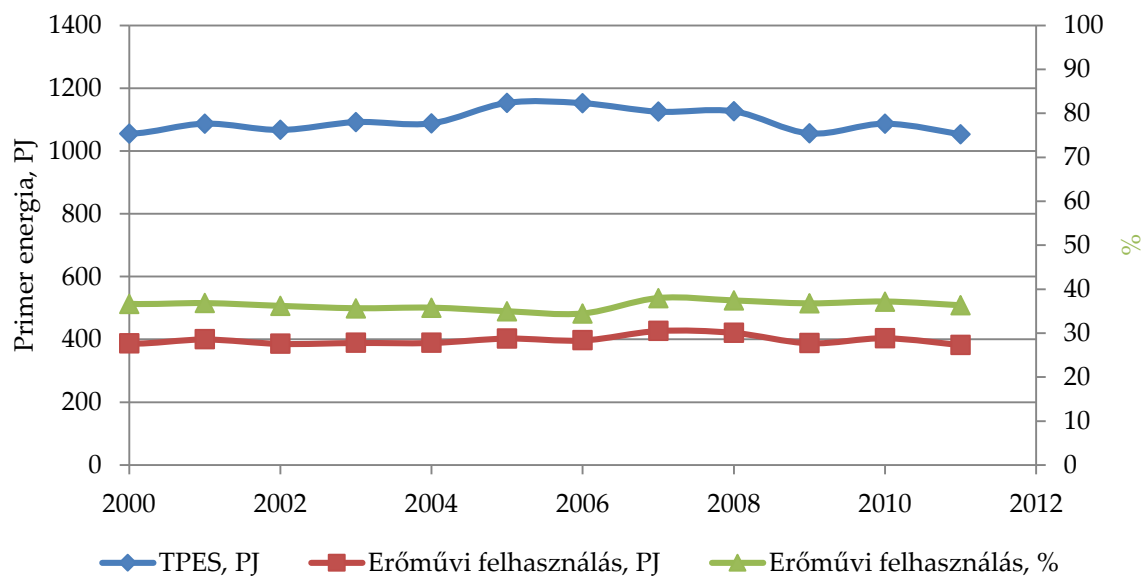
⁶ A fejezetben felhasznált adatok a Központi Statisztikai Hivatal, az Eurostat és a Nemzetközi Energia Ügynökség publikált adatsoraiból származnak.

Az 5-2. diagramon az előző mutatók vannak ábrázolva az egy főre vetített számértékeikkel. A népesség ebben az időszakban közel azonos ütemben csökken, 2011-ben 10 millió fő alá esik Magyarország lakossága. Látható, hogy a fejenkénti értékeknél is hasonlóan az 5-1 diagramhoz jelentkeznek a tendenciák. Ebből levonhatjuk a következtetést, hogy a lakosság ilyen kismértékű változása nem befolyásolja az energetikai mutatók tendenciáit.



5-2. diagram. Egy főre eső nemzetgazdasági mutatók

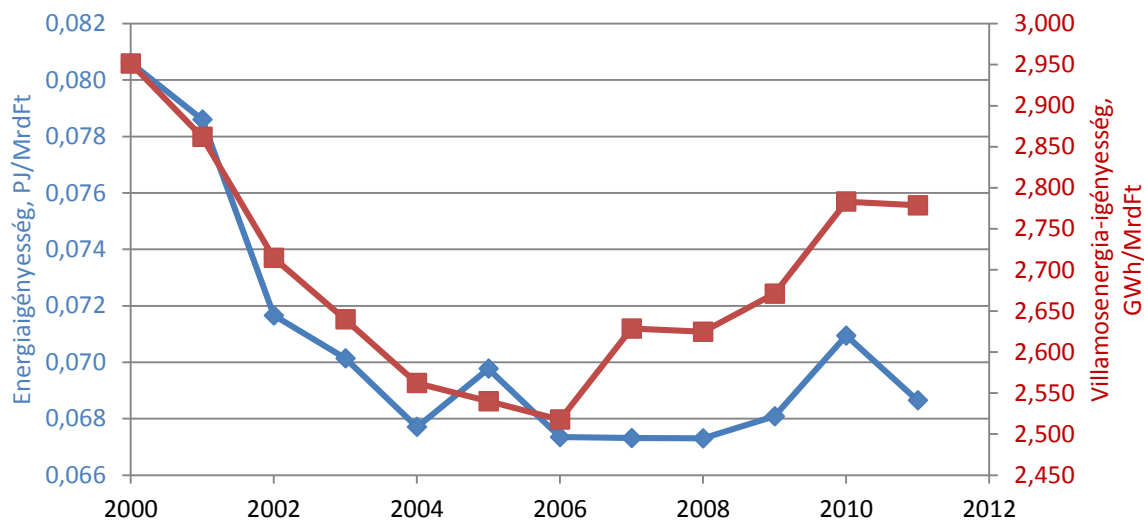
A primerenergia- és villamosenergia-felhasználás szoros együttmozgására ad magyarázatot az 5-3 diagram, ahol az ország teljes primerenergia-igénye és az ebből az erőművek által igényelt primer energia mennyisége van ábrázolva, illetve ezek aránya százalékos mértékben. Az utóbbi elég stabilnak mondható, hiszen a vizsgált több mint 10 év alatt nem mozdul ki a 34-38%-os sávból. az együttmozgás biztonsággal megállapítható.



5-3. diagram. Energiafelhasználások változása

A következőkben már a korábbiakban tárgyalt mutatók egymáshoz való viszonyát vizsgálom. Az egyik erre használatos energetikai mutató az energiaigényesség, ami a felhasznált (villamos)energia és a GDP hányadosa. Ennek megfelelően az energiaigényesség negatív tendenciája a kedvező a gazdaság számára, hiszen ez azt jelenti, hogy ekkor kevesebb energia-befektetéssel tud több terméket előállítani. (Másik elterjedt mutató még az energetikai hatékonyság, ami az energiaigényesség reciproka. Egymással való megfeleltethetőségük miatt csak az elsőt vizsgálom.)

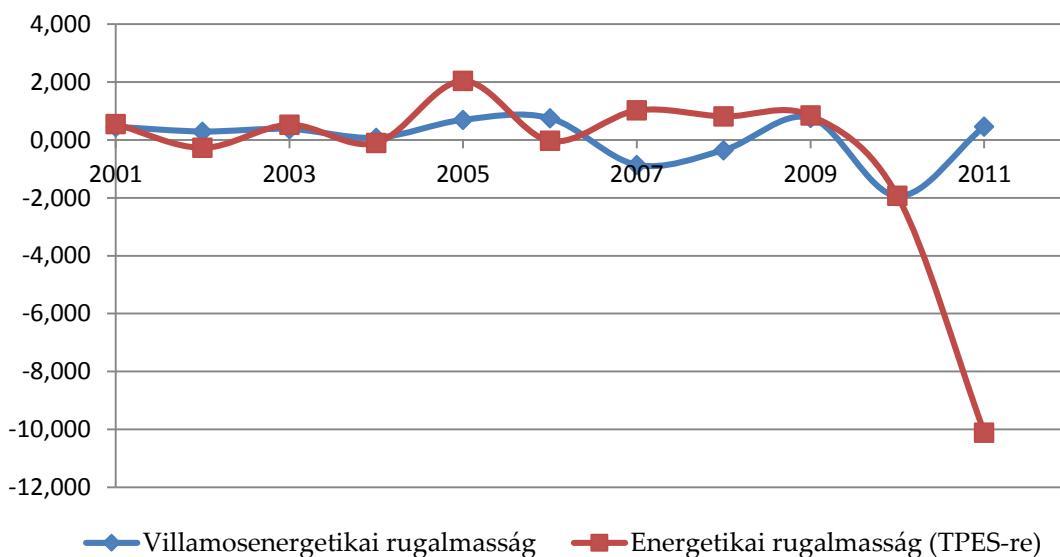
Az 5-4. diagramon látható, hogy a 2000-es évek eleji fejlődés során a GDP növekedési üteme meghaladta mind a primer-, mind a villamosenergia-felhasználás ütemét (ahogy ez az 5-1. diagram görbéinek a meredeksége is mutatja), ami csökkenő energiaigényességet eredményezett. A válság hatása itt is látványos: rövid stagnálás után rohamos növekedésbe kezdett az energiaigényesség. Ez azt jelenti, hogy a gazdaság kvantitatív visszaesése mellett kvalitatív hanyatlás is bekövetkezett. Az energiaigényesség gyakorlatilag elérte a 2001-2002-es szintet a primer- és villamos-energiára vonatkoztatva is, ami majd 10 éves visszaesést jelent.



5-4. diagram. Energiaigényességi mutatók változása

A következő, energetikai rugalmasság névre hallgató mutató azt árulja el, hogy a jövedelem relatív változása mekkora relatív energiaigény változást eredményez. Hasonlóan az előzőhöz, ezt is vizsgálom a primer- és villamos energiára is. Számítása:

$$d = \frac{\frac{\Delta E}{E}}{\frac{\Delta GDP}{GDP}} \quad (5.1)$$



5-5. diagram. Energetikai rugalmasságok alakulása

Látható, hogy az 5-5. *diagram* szerinti éves mutató elég hektikus változásokat mutat. Ebből arra következtethetünk, hogy az egymást követő évek szerinti vizsgálatból nem sok hasznos információt tudunk levonni, ezért vizsgáljuk közép és hosszú távon az energetikai rugalmasság értékét, amit az 5-2. *táblázat* ad meg.

5—2. *táblázat.* Energetikai rugalmasság közép- és hosszútávon

Időtáv	Energetikai rugalmasság (TPES-re)	Villamosenergetikai-rugalmasság
2002-2008 (középtáv - gazdasági fejlődés)	0,479	0,724
2008-2011 (középtáv - gazdasági hanyatlás)	0,765	0,335
2002-2011 (hosszútáv)	-0,441	1,761

Az energetikai rugalmasság 1-nél kisebb pozitív értéke azt jelenti, hogy az energiaigényesség változása előjelhelyesen leköveti a GDP változását, azonban a relatív változása nem lesz akkora mértékű. Gazdasági fejlődés esetén, amikor növekszik, a GDP és növekszik az energiafelhasználás is, akkor ez csökkenő energiaigényességet jelent. Azonban gazdasági hanyatlás esetén, amikor csökkenő GDP-hez csökkenő energiafelhasználás is tartozik, akkor az energetikai rugalmassági mutató egynél kisebb pozitív értéke az energiaigényesség növekedését jelzi.

Amennyiben a hosszútávot vizsgáljuk, a primerenergia-felhasználásra vonatkoztatott rugalmassági mutató negatív értéket vesz fel, ami azt jelenti, hogy ellenkező irányba mozgott az energiafelhasználás és a GDP változása. Jelen esetben a GDP valamelyest nőtt, az energiafelhasználás, viszont ha minimálist is, de csökkent. A villamos energiára vonatkoztatott rugalmassági mutató értéke viszont hosszútávon egynél nagyobb értéket vett fel, ami azt jelenti ebben az esetben, hogy a GDP növekedéséhez intenzívebben növekvő villamosenergia-felhasználás kapcsolódott, ami növelte az energiaigényességet.

5.3. Modell alkalmazhatóság, forgatókönyvek

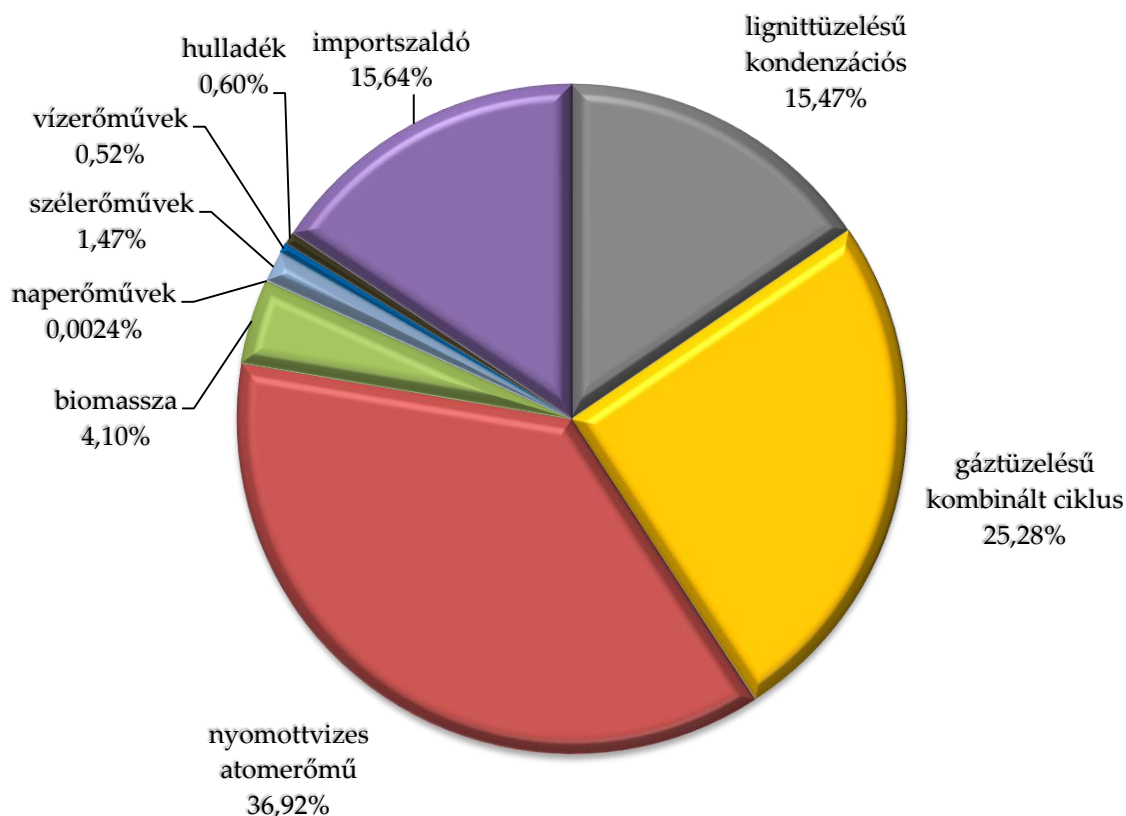
A modell jelenlegi állapotában a definiált lineáris összefüggésekkel alkalmas energiamix forgatókönyvek elemzésére a VER szempontjából. Ahhoz hogy legyen összehasonlítási alapunk, Magyarország 2011-es egyszerűsített adataival ábrázoltam a kiinduló állapotot. A számításokhoz az 5-1. táblázatban megadott technológiai alrendszer hatásfok értékei mellett még szükség van fajlagos szén-dioxid kibocsátás értékekre és import részarányra.

Az importfüggőség értelmezésénél az Eurostat definícióját vettem, miszerint *az importfüggőség megmutatja, hogy egy gazdaság mekkora mértékben támaszkodik importra, hogy kielégítse az energiaigényét.* Ez alapján az esetünkben a technológiai részrendszer primerenergia-ellátásának import arányával szoroztam be annak villamosenergia-termelését, így kaptam az import részarányt az egyes technológiai alrendszerekre. Ezt az elvet követve import szempontjából 0%-nak, azaz teljes hazai termelésnek vettem fel a lignittüzelésű erőmű által igényelt tüzelőanyagot és az összes megújuló energiaforrást hasznosító technológiát (a hulladékot is beleértve), 2011-es [15] adatok alapján a földgáz import részesedésének 77%, míg nukleáris fűtőanyagét 100% importnak tételeztem fel, amely nem változik a különböző forgatókönyvek során.

A szén-dioxid kibocsátás számításánál három technológia érintett: lignittüzelésű kondenzációs erőmű (1,2 t/MWh), földgáztüzelésű kombinált ciklusú erőmű (0,5 t/MWh) illetve hulladéktüzelésű erőmű (3,2 t/MWh). Ezek termelése alapján keletkező szén-dioxid kibocsátás összegzése adja a VER szén-dioxid kibocsátását. Az 5-3. táblázat mutatja a modell szerinti 2011-es állapotot, az 5-6. diagram pedig a technológiák villamosenergia-termelés szerinti részesedését.

5—3. táblázat. Magyarország modell szerinti mutatói (2011)

Villamosenergia-igény, GWh	42 482
VER teljes CO ₂ -kibocsátás, millió tonna	14,07
Import függő termelés, GWh	30 596
Import függőség, %	72,02%
Megújuló részarány, %	6,69%



5-6. diagram. Magyarország modell szerinti energiamixe (2001)

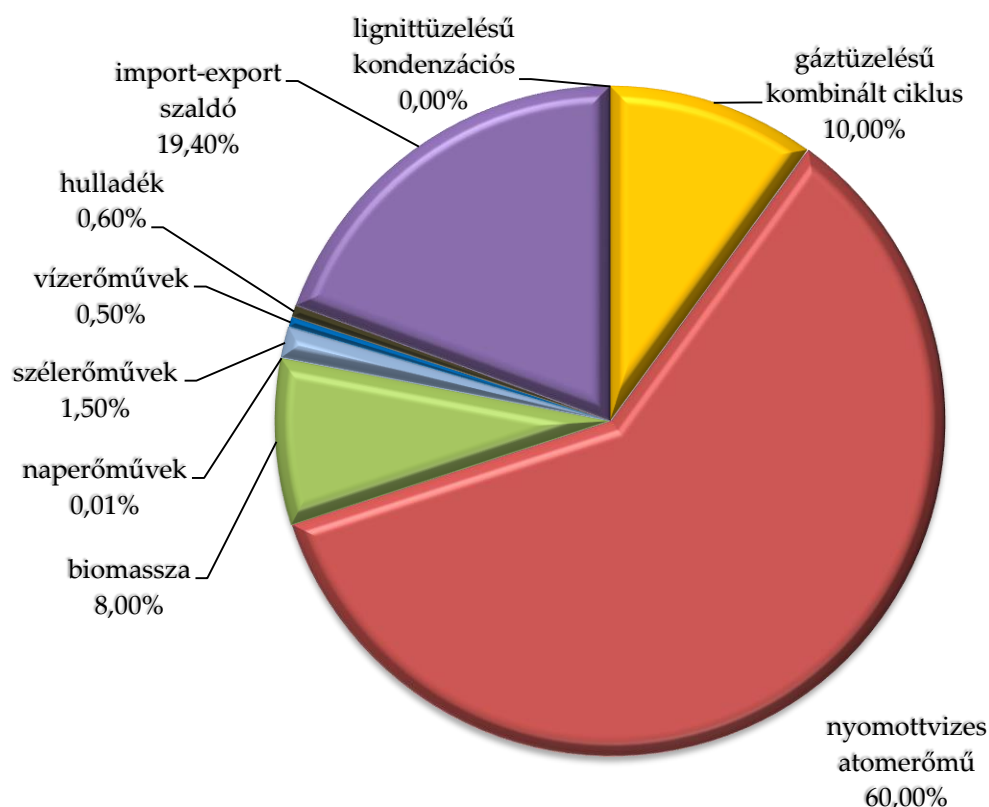
A forgatókönyveket 2030-as kitekintéssel vizsgálom, a jövőbeli villamosenergia-igényt 20 év adatainak a lineáris extrapolációjából kaptam, ami mindhárom esetben állandó, 50 878 GWh volt. Az egyes forgatókönyvek kialakítását étkezési szokások példáján keresztül mutatom be, mivel ahogy az ételeink megválasztása elhatározás kérdése, úgy az energiamix fejlődési tendenciája is kollektív elhatározáson múlik, és persze ne feledjük, hogy „*az vagy, amit megeszel*”.

5.3.1. ATOMJÖVŐ - „A PALEOLIT TÁPLÁLKOZÁS”

Az „Atomjövő” forgatókönyvben egy számunkra régóta jól bevált technológia mellett állunk ki és őseink példáján bővítjük lehetőségeink szerint úgy, ahogy a paleolit táplálkozás szerint követjük az ősember étkezési szokásait. A fehérjedús táplálékokhoz hasonlóan itt is preferáljuk a dús üzemanyagokat, név szerint az uránt. A Paksi Atomerőmű összes blokkjának üzemidő-hosszabbítása mellett felépítjük Paks II.-t szintén 2000 MW beépített kapacitással, ám ezzel még csak igényeink 60%-át tudjuk kielégíteni.

Az ősemlőshöz hasonlóan nem preferáljuk a szén és hidrogén kombinációját, így az energiamixben is lecsökken a szénhidrogén alapú technológia részaránya, mivel nem gondoskodtunk a kellő mennyiségű bevitelről. Támogatás híján az előregedő földgáztüzelésű blokkok bezárnak, csak néhány marad a szabályozási igények kielégítésére, mert hát mégsem lehet húst-hússal enni. Az ősemlő vadonban élő lényként megszokta a természet közelségét, némi növényi táplálék-kiegészítésre pedig mindenkinek szüksége van. Így a megújulóknak maradnak a természetes növekedési pályájukon, a biomassza továbbra is megőrzi vezető pozícióját köztük.

A földművelés ismeretlen volt ősemlőnk számára, így a Mátra környékén nem túrjuk tovább a földet, bezár az egyetlen lignittüzelésű erőműünk. A fennmaradó igényre pedig vesszük, amit találunk. Jelentős marad az import részaránya, mivel csak egy területre koncentráltunk, így nagy lesz az importfüggés viszont alacsony a szén-dioxid kibocsátásunk, nem terheljük annyira a környezetet. Ősemlőnk a természettel összhangban és annak kiszolgáltatva élte életét.



5-7. diagram. Atomjövő energiamix (2030)

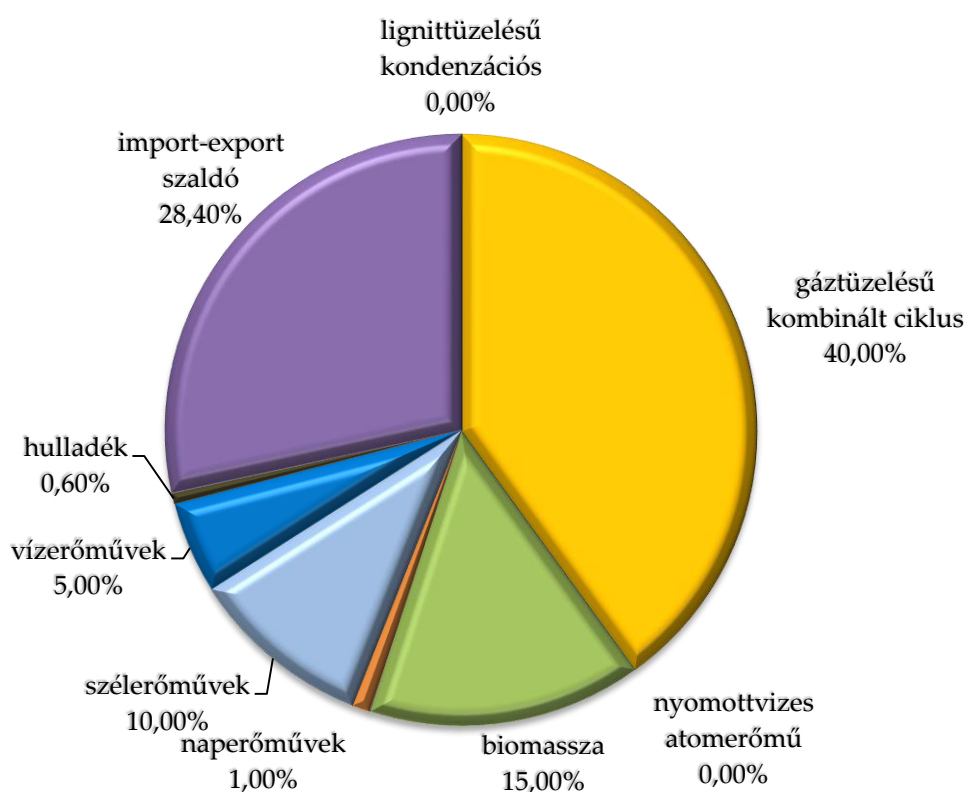
5.3.2. MEGÚJULÓ - „VEGETÁRIÁNUSKÉNT IS LEHET”

Manapság egyre inkább terjed a fenntartható környezetbarát életmód részeként a vegetáriánus étkezés. A „Megújuló” forgatókönyv is ezen elvek mentén építkezik, támogat mindent, ami megújuló és elvet mindent, ami nem az. A radikális zöld vonal erős lobbis tevékenysége révén bezár a lignittüzelésű erőmű és az atomerőmű. A kieső kapacitásokat megújuló termelőkkel kívánják helyettesíteni.

Komoly támogatást kapnak a naperőművek, azonban nem tudnak számottevő részesedésre szert tenni. A szélenergia engedélyezési korlátozásán túllépnek, a villamosmérnökök megoldják a szabályozási problémákat és a szélenergia engedélyek száma megnő 2000 MW-ra. Erős támogatást kap a biomassza alapú termelés, még Bős-Nagymaros kérdését is újratárgyalják, így a vízierőművek részesedése is megnő.

A vezetők belátják, hogy bármennyire is támogatják a megújulókat, azok növekedési üteme kevés ahhoz, hogy teljesen elhagyjanak minden fosszilis technológiát. Így a legtisztább fosszilis

forrás, a földgáz alapú termelők nagy részesedére tesznek szert, többek közt jól szabályozható technológiájukból kifolyólag is, amire igen nagy szükség van a megnövekedett időjárásfüggő termelők miatt. Emellett igen nagymértékben támaszkodik a forgatókönyv az importra, aminek a termeléséből adódó környezeti terhelés nem az ország területén történik. A környezetbarát szemlélet hatására a rendszer az időjárásfüggő termelők mellett az import villamos energiának és az import földgáznak is ki van szolgáltatva.



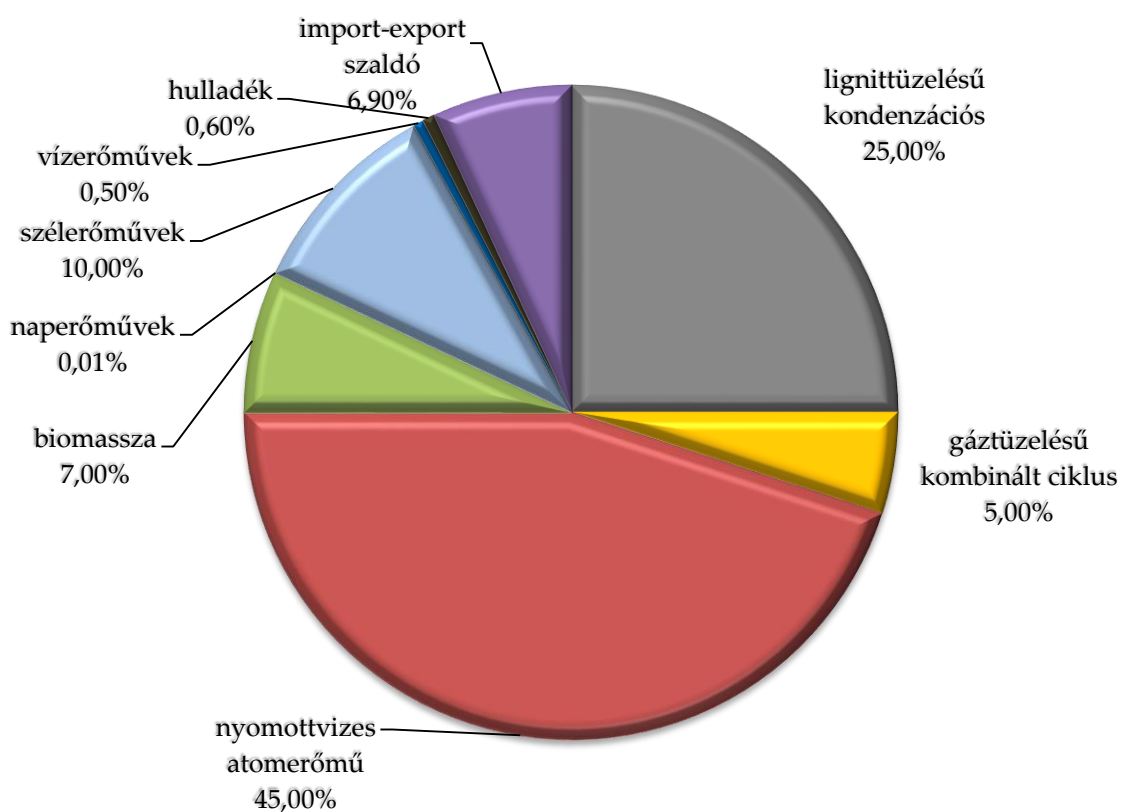
5-8. diagram. Megújuló energiamix (2030)

5.3.3. SZÉL-ATOM-SZÉN - „NINCS JOBB A HAZAINÁL”

A „Szél-Atom-Szén” forgatókönyv a nevében említett erőforrásokat preferálja. A hazai termelés előnyben részesítése mellett az atomerőmű üzemanyaga bár importból származik, azonban mégsem mondható zavarónak az ebből papíron származó importfüggőség, mivel jól raktározható. Ehhez tartva magukat a döntéshozók az atomerőművi kapacitás megmarad. Emellett persze az atomerőmű jelentős mennyiségű munkát ad nem csak a közvetlen foglalkoztatással, hanem az alvállalkozókon keresztül is.

Hazai tüzelőanyag-termelése és szintem magas munkahelyteremtő-képessége miatt is a lignittüzelésű termelés megduplázódik. Emellett tudatosan támogatják a szélerőművek telepítését kiszolgáló gyártóipart. A megerősödéséhez jelentős mennyiségű állami megbízást adnak ki szélerőművek telepítésére, miután kellő tapasztalattal és tőkével rendelkeznek a szektorhoz kapcsolódó cégek, a külföldi terjeszkedést serkentik és várják tőlük.

A többi megújuló a korábbi növekedési ütemet folytatva terjeszkedik. A gáztüzelésű erőművek részesedése lecsökken, mivel a vezetők az import gáz felhasználásának a csökkentését tűzték ki célul, az import részarány lecsökken ugyan, de még megmarad.



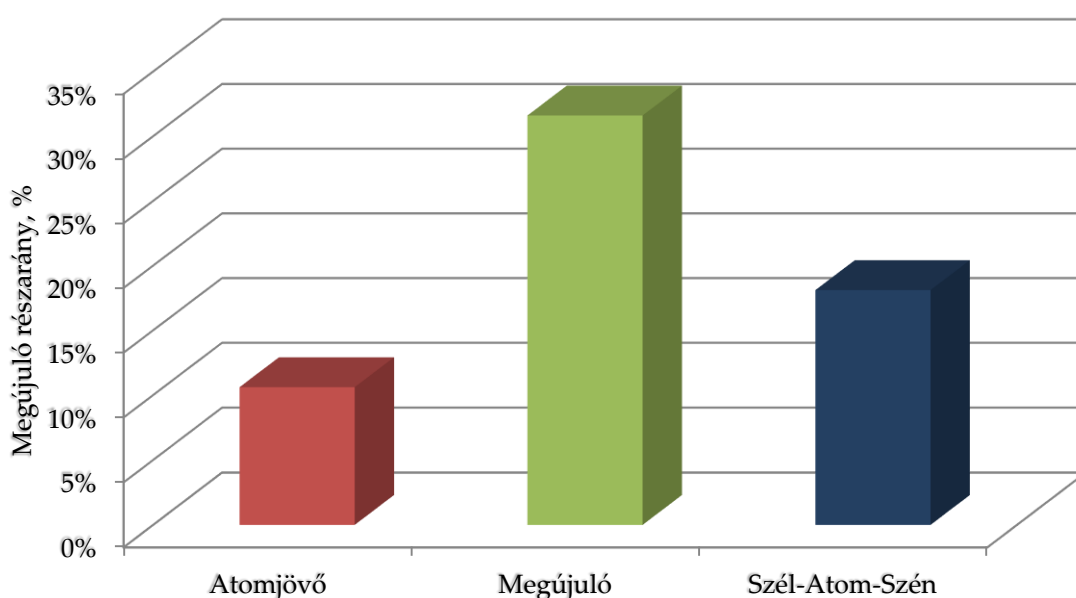
5-9. diagram. Szél-Atom-Szén energiamix (2030)

5.3.4. ÖSSZEHASONLÍTÁS, ÉRTÉKELÉS

A fent említett forgatókönyveket megújuló részarány, szén-dioxid kibocsátás és importfüggőség szerint hasonlítom össze. A scenáriók számítását elvégeztem technológiai fejlődést és technológiai hanyatlást feltételezve is. Ezt a technológiai alrendszerek villamosenergia-átalakítása hatásfokának évenkénti tizedszázalékos nagyságrendű

növekedésével illetve csökkenésével vettem figyelembe. Természetesen adtam meg technológiai maximum hatásfokot, ami azonban egy esetben sem értek el, mivel a vizsgált időintervallum túl rövid volt ehhez. A hatásfokváltozásokból fakadóan számított végeredmények 1% körül eltérést mutattak. Nagyobb lépték technológiai fejlődés vagy hanyatlás feltételezése nem lett volna indokolt, ezért ezt nem tárgyalom részletesen ebben a munkában.

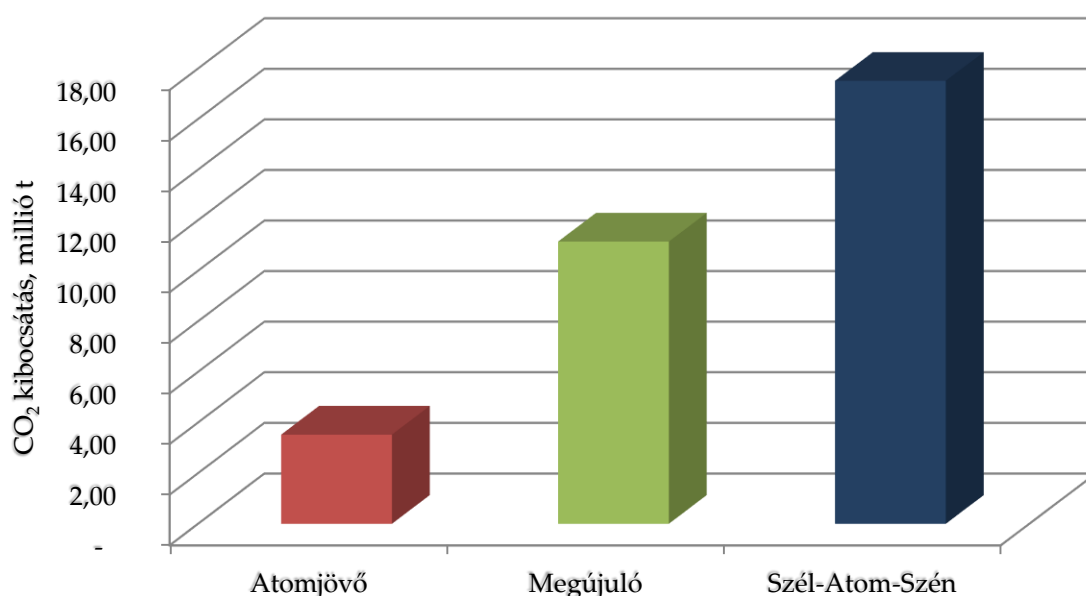
A megújuló energiaforrások részaránya szempontjából (5-10. diagram) egyértelmű fölényrel rendelkezik a „Megújuló” forgatókönyv a 32%-os részarányával. A „Szél-Atom-Szén” a támogatott szélerőművek miatt 18%-os részesedést ért el, az „Atomjövő” forgatókönyv pedig 11%-al a legcsekélyebb a többi mellett.



5-10. diagram. Megújuló részarány a különböző forgatókönyvek esetén

Szén-dioxid kibocsátás szempontjából az „Atomjövő” a legelőnyösebb, hiszen a nukleáris termelés magas részaránya és szén-dioxid semleges volta miatt erősen lehúzza az össz szén-dioxid kibocsátást. Ezzel szemben a „Szél-Atom-Szén” esetében hiába az atomerőmű jelentős részaránya, a lignittüzelés magas kibocsátása elviszi az egész mixet, így ez lesz a legkedvezőtlenebb forgatókönyv ebből a szempontból. A „Megújuló” a kettő közt helyezkedik

el, ugyan a megújulókból és az importból nem keletkezik sok szén-dioxid papíron, azonban a földgáz nagy részarány érezhető a végösszeznél (5-11. diagram).

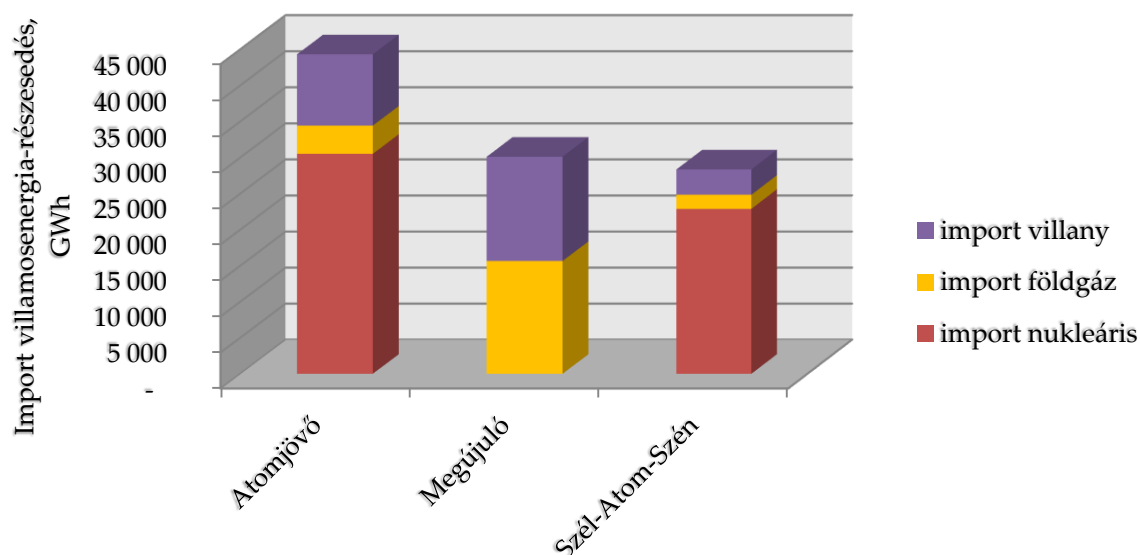


5-11. diagram. Szén-dioxid kibocsátás a különböző forgatókönyvek esetén

Az importfüggőség értékelése szempontjából fontosnak tartom azt is megjeleníteni, hogy miből származik a függőség. Az Eurostat definíciójából ugyan adódik egy százalékos arány a függőségre, azonban az importfüggőség tárgyalásánál véleményem szerint nem feltétlen annak kell a meghatározó tényezőnek lennie, hogy hazai termelés vagy import. Az importfüggőség fő hátránya a kiszolgáltatottság, amiből nyugodt piaci körülmények között nem nagyon érzünk meg, esetleg tárgyalásoknál indulhatunk emiatt hátrányos pozícióból. A kiszolgáltatottság akkor válik érezhetővé, ha a piac ellátási oldalán valamilyen zavar keletkezik és veszélybe kerül az ellátás. Ebből a szempontból viszont jelentős különbség van például a földgáz és a nukleáris üzemanyag között, hiszen a tartalékolhatóság nagyban eltér a kettő esetében. Ebből kiindulva a piaci zavarokkal szembeni kitettségnek kellene a meghatározónak lennie. A kérdéskör további tanulmányozása és beépítése a modellbe egy bővítési lehetőség lehet a későbbiekben.

Az „Atomjövő” forgatókönyv adja a legnagyobb importfüggőséget a magas nukleáris részarány miatt, azonban ha figyelembe vesszük a korábbi gondolatokat, akkor a „Megújuló”

adja a legnagyobb kitettséget, ezzel szemben a „Szél-Atom-Szén” adja a legalacsonyabb importfüggést a tartalékolhatóság figyelembevételével és anélkül is (5-12. diagram).



5-12. diagram. Import részarány a különböző forgatókönyvek esetén

5.4. Kitekintés

A forgatókönyvek és az energetikai mutatók során felmerültek már a modell bővítési és finomítási lehetőségei - mint például az importfüggőség alternatív leírása -, ezek mellett nyilvánvaló kiterjesztési irány még a hőtermelési- és közlekedési alrendszer bekapcsolása a modellbe. Azonban még mielőtt ezeket elkezdhetnénk tárgyalni, verifikálni kell az összefüggéseket és mutatók viselkedését, hiszen csak akkor lehet előrejelzést készíteni egy modell segítségével, ha a jelenlegi és korábbi állapotokat jól le tudja írni.

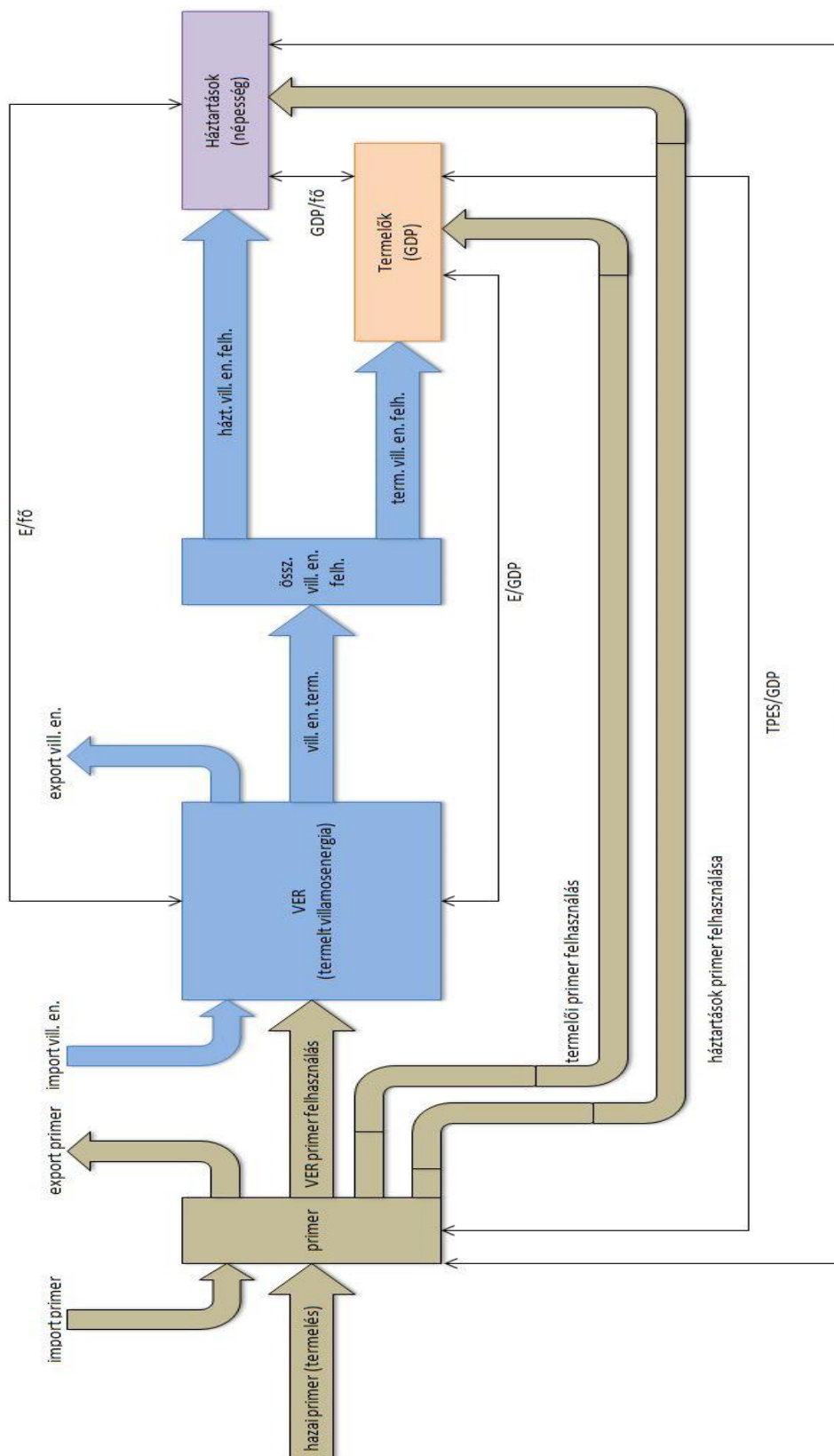
Ehhez kapcsolódóan megvizsgálhatjuk a különböző energetikai mutatókat egy másik rendszer adataival. Portugália egy jó példa erre, hiszen Magyarországhoz hasonló mérettel, népességgel és primerenergia-felhasználással rendelkezik. Azonban jobban megvizsgálva jelentős eltérések adódnak a villamosenergia-rendszerre vonatkozó mutatók esetében (5-4. táblázat).

5—4. táblázat. Jellemző adatok, HUN-POR

2011-es IEA adatok	Magyarország	Portugália
Terület, km ²	93 036	92 391
Népesség, millió fő	9,97	10,65
Összenergia felhasználás, PJ	1045,03	966,31
GDP, Mrd 2005 USD	111,16	194,10
GDP PPP, Mrd 2005 USD	172,52	228,08
Beépített erőművi kapacitás, MW	9 890	20 928
Villamosenergia-felhasználás, GWh	42 626	55 272
- ebből lakossági, GWh	11 312	13 752
- ebből termelői, GWh	31 314	41 520

Az 5-4. táblázat első három adata, mint már említettem közel azonos. A GDP-k viszont már jelentősen eltérnek, reál GDP esetén például 50 Mrd USD-vel többet termeltek 2011-ben. A beépített erőművi kapacitásuk több mint kétszer akkora, mint a mienk, ezen túlmenően a villamosenergia-felhasználásuk több mint 10 000 GWh-val nagyobb. A beépített kapacitások jelentős méretkülönbsége a portugál szél és vízerőművekből ered. A népesség közel azonos nagysága és a GDP ilyen méretű eltérése azt sugallja, hogy a fogyasztói alrendszert érdemes lehet továbbbontani.

Kézenfekvő, hogy a népesség közel azonos mérete miatt kezeljük külön a háztartások villamosenergia-fogyasztását, hiszen így a fennmaradó fogyasztás gyakorlatilag a termelő ágazatok fogyasztása, amelyek a GDP-t termelik. A háztartások pedig egyáltalán nem, vagy csak minimális mértékben termelnek GDP-t. Az így szétválasztott rendszer áttekinthető képét az 5-4. ábrán láthatjuk.



5-4. ábra. A modell bővített folyamatábrája

A szétválasztott háztartások és termelők alrendszerrel új primer- és villamosenergia-áram jelent meg, ezekkel új energetikai mutatók felírására nyílik lehetőség. Nyilván szorosabb összefüggést fogunk találni a termelt GDP és a GDP termeléséhez felhasznált villamos energia között, mintha a GDP-t az egész ország villamosenergia-felhasználásához viszonyítanánk. Ennek megfelelően pontosabb összefüggésekkel tudjuk leírni és jellemezni a gazdaságot és annak viselkedését, fejlettségét. Hasonló módon a háztartásokra vonatkoztatva pontosabb képet kapunk, a lakosság igényeiről, a fejlettségükről és az energiatudatosságukról.

Amint ezeket mutatókat körbejárjuk annyira, hogy már tudjunk számolni velük és a mutatókból (társadalmi-, gazdasági fejlettség ismeretéből) határozzuk meg az energiaigényeket, akkor használható lesz a modell előrejelzések készítésére is. Addig lineáris összefüggésrendszerként tud működni. Jelenleg kevés változó van a modellben, de továbbiak (szén-dioxid kibocsátás, költségek) beléptetésével alkalmas lesz a *3. fejezetben* tárgyalt eljárások alkalmazására is. A modell bővítése a bemutatott portugál-magyar példán keresztül bővíthető, miszerint anomáliákat kell keresni a modellben, ha találtunk, akkor a modell szerkezetéből adódó anomáliákat meg kell szüntetni az alrendszerek közötti viszonyok tisztázásával, alrendszerek osztásával. Ez után verifikálni kell a modellt, hogy visszaadja-e azokat az eredményeket, amiket várunk, ha igen, akkor folytathatjuk ezt a folyamatot, amíg kellő pontosságú modellt nem kapunk.

A modell könnyedén skálázható, hiszen alapvetően az anyag-, energia- és információ áramok általános érvényűek. Más környezetbe ültetve az eszközparkját kell módosítani, például kisebb térségek esetén más technológiai alrendszerek jelennek meg a decentralizált energiatermelés révén. A modell további bővítése során szem előtt kell tartani, hogy ezek a részek könnyen „cserélhetők” legyenek, sőt a szimuláció során a modell maga tudja elvégezni az egyes technológiai alrendszerek be- és kiléptetését, ezzel kizárva a modellkészítő elfoglaltságait. A modell végső célja, hogy kiszervezze a szubjektivitást az energetikából.

6. ÖSSZEGZÉS

Rövid bevezető után a munkám elején a második fejezetben a tisztánlátás kedvéért ismertettem a rendszermodellezéssel kapcsolatos főbb fogalmakat és szemléletmódokat, amit a későbbiekben követtem is. A harmadik fejezetben a teljesség igénye nélkül ismertettem a többváltozós optimalizálási eljárásokat. Látható, hogy széles paletta áll rendelkezésre az ilyen jellegű problémák megoldására. A módszerek bonyolultsági fokban és pontosságukban térnek el egymástól, a választás előtt meg kell határozni a kívánt mélységet, hogy az ahhoz a legmegfelelőbbben illeszkedő módszerrel dolgozzunk.

A negyedik fejezetben foglalkoztam a már létező világ- és energetikai modellekkel. A fejezet elején röviden tárgyaltam néhány ismertebb, nagyobb lélegzetvételű modellt, amelyet különböző célzattal hoztak létre. A World3 modellt kellő ambícióval a '70-es években a világ modellezésére hozták létre, hogy előre jelezzék a Föld teherbírását. A Nemzetközi Energia Ügynökség hozta létre a Markal és a World Energy Model-t. Az előbbi lineáris működésével alkalmas országos, regionális rendszerek gazdaságilag optimális energiamixének a kiválasztására, míg a World Energy Model az energetikához kapcsolódó piacokat modulszerűen modellezi korábbi statisztikai adatokra támaszkodva, eredményeiből kerül publikálásra a World Energy Outlook.

A negyedik fejezet további részében két Magyarországgal kapcsolatos munkát dolgoztam fel. Az elsőben különböző forgatókönyvek elemzésére használtak fel többváltozós optimalizálási eljárást. A súlyozott összeg módszer segítségével hasonlították össze a scenáriókat, a súlyfaktorokat pedig kérdőíveztetéssel határozták meg. Az eredmények a szenes verziót leszámítva viszonylag szűk tartományon belül szórtak. A másik bemutatott munka pedig egyváltozós optimalizáláson keresztül mutatott be néhány energiamix változatot, melyekből leszűrhető kvantitatív tapasztalat, azonban nem ad átfogó képet, csupán egy-egy specifikus kérdés megválaszolására ad lehetőséget.

Az ötödik fejezetben az épített modell működését és módszertanát írom le. Lefektetem az alapjait egy komplex energetikai modellnek, vizsgálom az egyes alrendszerek és áramok közötti összefüggéseket, hogy azokat felhasználva később szimulációra alkalmas modellt készítsék. Az alapmodell segítségével vizsgálom három forgatókönyvet, amelyeket étkezési

szokások hasonlatain keresztül mutatok be, majd értékelem azokat megújuló részarány, széndioxid-kibocsátás és importfüggőség szempontjából.

A kitekintés részben a portugál-magyar anomálián keresztül bemutatom a modell bővítési folyamatát. A módszert mindig alkalmazni kell, ha találunk olyan anomáliát, ami indokoltá teszi a rendszer struktúrájának átalakítását. Foglalkozok még a többváltozós optimalizálási eljárások rendszerbe illeszthetőségével és a modell skálázhatóságával.

Jelen munkában egy többváltozós optimalizálási eljárások alkalmazására képes komplex energetikai rendszermodell alapjait fektetem le és bemutatom, hogyan lehet eljutni az alapoktól a kívánt bonyolultsági fokig. A modell és szimulációi célja, hogy segítségükkel objektív módon lehessen nyilatkozni egy ország vagy régió energiamixéről és elfogulatlanul lehessen energiastratégiát alkotni rá. A végső cél, hogy kiszervezze a szubjektivitást az energetikából.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] JOHAN ANDERSON: A survey of multiobjective optimization in engineering design
LiTH-IKP-R-1097 É.n.
- [2] ANDREW ARNETTE, CHRISTOPHER W. ZOBEL (2012): *An optimization model for regional renewable energy development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, pp. 4606.-4615.
- [3] R. BANOS, F. MANZANO-AGUGLIARO, F. G. MONTOYA, C. GIL, A. ALCAYDEB, J. GOMEZ (2011): *Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pp. 1753.-1766.
- [4] JUSTIN D. K. BISHOP, GEHAN A. J. AMARATUNGA, CUAUHTEMOC RODRIGUEZ (2010): *Linking energy policy, electricity generation and transmission using strong sustainability and co-optimization*. Electric Power Systems Research, 80, pp. 633.-641.
- [5] NINO BOCCARA (2004): *Modeling Complex Systems*. Springer, New York
- [6] ENDRE BÖRCSÖK, JÁNOS OSÁN, SÁNDOR BOZÓKI, SZABINA TÖRÖK (2011): *Több szempontú döntési modell alkalmazása a hazai villamosenergia-termelési rendszer fejlesztésében* Magyar Energetika, 18. 2011/3. pp. 28-32
- [7] FAZEKAS ANDRÁS ISTVÁN (2005): *Villamosenergia-termelés technológiák összehasonlítása, A komplex összehasonlítás szempontrendszere*. Magyar Atomforum Egyesület, Budapest
- [8] GÁCS IVÁN (2012): *Villamosenergia-termelés gazdasági értékelése*. BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, H. n.
- [9] GARBAI LÁSZLÓ, MÉHES SZABOLCS (2007): *Hőszivattyús energetikai rendszerek komplex rendszerelméleti modellje*. Magyar Épületgépészet, 56. 2007/11. pp. 35-40
- [10] IEA (2012): *World Energy Model Documentation*. I. k., H. n.

- [11] RALUCA I. IORGULESCU, JOHN M. POLIMENI (2009): A multi-scale integrated analysis of the energy use in Romania, Bulgaria, Poland and Hungary. *Energy*, 34, pp. 341.-347.
- [12] PETER KADAR (2010): Multi Objective Power Mix Optimization H.n., I.k.
- [13] ABDULLAH KONAK, DAVID W. COIT, ALICE E. SMITH (2006): *Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial*. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, pp. 992.-1007.
- [14] J. LIU, Q.G. LIN, G. H. HUANG, Q. WU, H. P. LI (2013): Energy systems planning and GHG-emission control under uncertainty in the province of Liaoning, China – A dynamic inexact energy systems optimization model. *Electrical Power and Energy Systems*, 53, pp. 142.–158.
- [15] MAGYAR ENERGETIKAI ÉS KÖZMŰSZABÁLYOZÁSI HIVATAL, MAVIR (2012): *A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2012. évi statisztikai adatai*. MKEH, H.n.
- [16] DAIKI MIN, JAEWOO CHUNG (2013): Evaluation of the long-term power generation mix: The case study of South Korea's energy policy. *Energy Policy*, 62, pp. 1544.-1552.
- [17] H. MIRZAESMAEELI, A. ELKAMEL, P. L. DOUGLAS, E. CROISET, M. GUPTA (2010): *A multi-period optimization model for energy planning with CO₂ emission consideration*. *Journal of Environmental Management*, 91, pp. 1063.-1070.
- [18] MOHAN MUNASINGHE, PETER MEIER (1993): *Energy Policy analysis and modeling*. Cambridge University Press, Cambridge
- [19] ILHAN OZTURK, ALI ACARAVCI (2010): The causal relationship between energy consumption and GDP in Albania, Bulgaria, Hungary and Romania: Evidence from ARDL bound testing approach. *Applied Energy*, 87, pp. 1938.–1943.

- [20] SUGÁR ANDRÁS (2011): A piacszabályozás elméleti és gyakorlati aspektusai a közszolgáltató szektorokban, elsősorban az energiaszektor árszabályozása példáján - Ph. D értekezés. BCE Közgazdaságtani Doktori Iskola, Budapest
- [21] SZÜCS ERVIN (1972): *Hasonlóság és modell*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [22] SZÜCS ERVIN (2000): *Modellezés elmélete és gyakorlata*. Szolnoki Főiskola, Szolnok
- [23] SZÜCS ERVIN (2000): *Modellezés matematikai alapjai*. Szolnoki Főiskola, Szolnok
- [24] SZÜCS ERVIN (1996): *Rendszer és modell I*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- [25] SZÜCS ERVIN (1997): *Rendszer és modell II*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
- [26] AIDID CHEE TAHIR, RENÉ BAÑARES-ALCÁNTARA (2012): A knowledge representation model for the optimisation of electricity generation mixes. *Applied Energy*, 97, pp. 77.–83.
- [27] KLAUS WEBER, DAG MARTINSEN (2013): From system cost minimization to sustainability maximization - A new fuzzy program approach to energy systems analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 231, pp. 1.–25.
- [28] RUUD WEIJERMARS, PETER TAYLOR, OLIVIER BAHN, SUBIR RANJAN DAS, YI-MING WEI (2012): Review of models and actors in energy mix optimization e can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems? *Energy Strategy Reviews*, 1, pp. 5.-18.
- [29] ZHIBIN WU, JIUPING XU (2013): Predicting and optimization of energy consumption using system dynamics-fuzzy multiple objective programming in world heritage areas. *Energy*, 49, pp. 19.-31.
- [30] QI ZHANG, BENJAMIN C. MCLELLAN, TETSUO TEZUKA, KEIICHI N. ISHIHARA (2013): *An integrated model for long-term power generation planning toward future smart electricity systems*. *Applied Energy*, 112, pp. 1424.–1437.

- [31] ECKART ZITZLER (1999): Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimazitaion: Methods and Applications
- [32] ECKART ZITZLER, MARCO LAUMANN, STEFAN BLEUER: *A tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization* H.n., I.k., É.n.

8. ÁBRÁK JEGYZÉKE

2-1. <i>ábra.</i> Analitikus szemlélet	5
2-2. <i>ábra.</i> Szintetikus szemlélet	5
4-1. <i>ábra.</i> Az ERŐTERV által összeállított öt scenárióhoz tartozó beépített bruttó teljesítőképesség primer energiahordozók szerinti részaránya a várható erőmű-leállások pótlására [2]	16
4-2. <i>ábra.</i> Az MCDA-AHP (Multi-Criteria Decision Analysis Analytic Hierarchy Process) módszer legfontosabb lépései [2].....	18
4-3. <i>ábra.</i> Öt primerenergia-mixre vonatkozó scenárió értékelése, három megújuló részarány-bebecsléssel [2]	22
5-1. <i>ábra.</i> Szemlélet bővítése a modellépítés során	25
5-2. <i>ábra.</i> VER folyamatábra	27
5-3. <i>ábra.</i> A modell folyamatábrája	28
5-4. <i>ábra.</i> A modell bővített folyamatábrája	44
4—1. <i>táblázat.</i> Három becslés a megújuló energiát hasznosító, újtelepítésű erőművek beépített teljesítményének százalékos részarányára [2]	17
4—2. <i>táblázat.</i> Az energiatermelési lehetőségek összehasonlításához használt szempontrendszer [2]	19
4—3. <i>táblázat.</i> A hazai erőművek éves kihasználása a MAVIR-ERŐTERV becslésének felső határát véve alapul [2]	21
5—1. <i>táblázat.</i> Technológiai alrendszerek	26
5—2. <i>táblázat.</i> Energetikai rugalmasság közép- és hosszútávon	33
5—3. <i>táblázat.</i> Magyarország modell szerinti mutatói (2011)	34
5—4. <i>táblázat.</i> Jellemző adatok, HUN-POR	43
5-1. <i>diagram.</i> TPES, E és GDP volumenindexek	29
5-2. <i>diagram.</i> Egy főre eső nemzetgazdasági mutatók.....	30
5-3. <i>diagram.</i> Energiafelhasználások változása	31
5-4. <i>diagram.</i> Energiaigényességi mutatók változása	32
5-5. <i>diagram.</i> Energetikai rugalmasságok alakulása	32

5-6. <i>diagram</i> . Magyarország modell szerinti energiamixe (2001)	35
5-7. <i>diagram</i> . Atomjövő energiamix (2030)	37
5-8. <i>diagram</i> . Megújuló energiamix (2030)	38
5-9. <i>diagram</i> . Szél-Atom-Szén energiamix (2030)	39
5-10. <i>diagram</i> . Megújuló részarány a különböző forgatókönyvek esetén	40
5-11. <i>diagram</i> . Szén-dioxid kibocsátás a különböző forgatókönyvek esetén	41
5-12. <i>diagram</i> . Import részarány a különböző forgatókönyvek esetén	42