

Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés



**Döntéstámogatás energetikai problémákban, többcélú
optimalizálással**

Börcsök Endre

Témavezető:

Fülöp János

Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika

Doktori Iskola

Budapest, 2022. június

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. Tartalmi vázlat	2
2. Energetikai döntéstámogatási módszerek és a további felhasznált matematikai eszközök történeti áttekintése	4
2.1. Energetikai modellekhez kapcsolódó optimalizálási eljárások általános ismertetése	5
2.2. Döntéstámogatáshoz kapcsolódó matematikai eszközök ismertetése	11
3. Döntéstámogatási és optimalizálási problémákhoz illeszthető matematikai módszerek az energetika területéről	19
3.1. Hátizsák feladat megközelítés	20
3.2. Többcélú optimalizálás	27
3.3. Nemlineáris optimalizálás	30
3.4. Értékelési szempontrendszer kialakítása	34
3.5. Értékelési szempontsúlyok meghatározása	38
4. Eredmények	43
4.1. Energetikai forgatókönyvek szerkesztése hátizsák feladatként	43
4.2. Energetikai forgatókönyvek szerkesztése többcélú optimalizálással	49
4.3. Költség bizonytalanságok kezelése nemlineáris optimalizálással	54
4.4. Értékelési szempontrendszer kialakítása döntéstámogatási problémákban	59
4.5. Értékelési szempontsúlyok meghatározása többcélú optimalizáláshoz	66
5. Összegzés	74
6. Új tudományos eredmények	75
Köszönetnyilvánítás	77
Irodalmi hivatkozások listája	78
Ábrák és táblázatok jegyzéke	81
Rövidítések jegyzéke	83
Mellékletek	84

1. Bevezetés

A teljes XX. századot a villamosenergia-termelésben a centralizált nagy erőművek kizárólagos jelenléte jellemezte, és az erőművek üzembe helyezéséhez kapcsolódó döntéseknél geopolitikai és gazdasági szempontok domináltak. Az ipari termelőegységek a fejlődés megkérdőjelezhetetlen megtestesítői voltak. A velük kapcsolatos társadalmi kép, fokozatosan, a hozzájuk kapcsolódó egészségügyi és környezeti hatások tudományos föltárásával árnyalódott. A társadalmi megítélés átalakulásának fontos mérföldköve a Brundtland-bizottság 1987-es jelentése [1], ahol javaslat készült a gazdasági pillér mellett a környezeti és társadalmi szempontok döntésekbe történő bevonására, és olyan, mai napig alapvető hívószavak kerültek megfogalmazásra, mint a fenntarthatóság fogalma. Az új fogalmak megjelenésével és az értékelési szempontok bővülésével, az energetikai alternatívák megítélésére vagy összehasonlítására alkalmas matematikai eszközök a többszemponútú döntési modellek irányába tolódtak el. A többszemponútú döntési eljárások alkalmazásához a szempontok részletes tanulmányozása szükséges, teljesség és redundancia vizsgálattal. A teljesség követelményénél az értékelés holisztikus volta kerül fókuszba, míg a redundancia vizsgálatnál a szempontok diszjunkt tulajdonsága. A döntési szempontrendszer kialakítása mellett azonban külön módszertant igényel a végső szempontrendszer aggregálása. A XXI. század első évtizedében több nemzetközi szervezet foglalkozott tanulmányaiban az energetikához kapcsolódó szempontok összegyűjtésével, rendszerezésével [2]. A korszak kutatási területe az energetikai alternatívák, fontosabb szempontok szerinti összehasonlítására fókuszált és a szempontok aggregálása sokáig csupán monetarizált költségek alapján volt elképzelhető. Mivel a monetarizált költségek a gazdasági szempontok dominanciájára utalhatnak, így számos alternatív rangsorolási módszer is kidolgozásra került ebben az időszakban a környezeti vagy társadalmi hatások kihangsúlyozásával mint ökológiai vagy karbon lábnyom, élőbolygó vagy fenntarthatósági index. A mára kidolgozott több száz mutató, lábnyom és index jelzi, hogy nincs egyértelműen értelmezhető szempontrendszer, illetve súlyozás egy-egy általános fogalomhoz (pl. jólét, fenntarthatóság, biztonság), és ezek alapján a teljesség és redundancia is nehezen garantálható. Munkámban a döntési szempontok egyéni definiálására dolgoztam ki matematikai módszert és szempontok súlyozására olyan eljárásokat fejlesztettem tovább, melynél a redundancia nem követelmény. Természetesen a szemponthalmaz megléte és fontossági értékelése elengedhetetlen a döntéstámogató módszerekénél, azonban az energetikai problémáknál hasonló kihívást tartogat a számos

követelményt kielégítő forgatókönyvek megszerkesztése is. Az energetikai forgatókönyvek, vagyis forrásösszetétel meghatározására alapvető eszköz az ún. „merit order” technika, melynek elsődleges szerepe a kevésbé rugalmasan üzemeltethető alap, és a gyors indítású csúcs erőművek arányának meghatározása, elsősorban gazdasági alapon, figyelembe véve az éves fogyasztási adat szerkezetét (tartamdiagram). A mai kor energetikai forrásösszetételében azonban az időjárásfüggő megújuló energiaforrások kiemelt szerepet játszanak, és így hangsúlyozottan jelentkezik a „merit order” technika legnagyobb hiányossága, hogy a napi, heti vagy szezonális, esetleg sztochasztikus ciklusok kezelésére alkalmatlan. Mivel a forrásösszetétel meghatározás alapvetően operációkutatási feladat, hiszen a szűkösen rendelkezésre álló erőforrások, adott szempontok szerinti optimális kihasználása a cél, így nem meglepő, hogy a jelenleg alkalmazott modellek elsősorban disztribúciós feladatként közelítik meg az ilyen jellegű problémákat (TIMES, MESSAGE) [3][4]. Tanulmányomban szereplő energetikai modellek mindegyike, tágran értelmezve disztribúciós feladatként jellemezhető, azonban a valós példákon keresztül bemutatott, változatos módszertani megközelítések, egyéni megfogalmazást igényeltek, komoly informatikai háttér kialakításával. A kidolgozott modellek nagy előnye a meglévő piaci szoftverekkel szemben a nagyfokú rugalmasság a felhasznált adatok felbontásában, a célfüggvények megfogalmazásában és az iterált futtathatóság terén, melyek új távlatokat nyitottak a kutatási és felhasználási terület kibővítésében.

1.1. Tartalmi vázlat

Munkámban öt energetikai problémát megoldva mutatok be döntéstámogatási eljárásokat, melyek mindegyikében szerepet kapnak a lineáris optimalizálási vagy a többszemponútú döntési modellek. A kidolgozott feladatok az energetikának jelenleg is kutatott területeit érintik és szinte minden esetben olyan specializált matematikai megközelítés került alkalmazásra, melyek a gyakorlati problémákhoz tökéletesen illeszkednek. Az első három témakör alapfeladatai disztribúciós feladatok, ahol az ellátási és fogyasztási oldal között egyensúlyozó, peremfeltételeknek megfelelő, optimális megoldás meghatározása a cél. A három témakör mindegyike egymáshoz közelálló probléma, melyek a megoldandó feladat más-más szeletét világítják meg. Az utolsó két témakör a döntési szempontrendszer

kialakításának, illetve a hozzájuk kapcsolódó szempontsúlyok meghatározásának egy lehetséges módszertanát ismerteti az energetika területéről, egy reprezentatív társadalmi felmérés adatainak feldolgozásán keresztül.

1. Hátizsák feladat megközelítés

Az első esetben egy disztribúciós feladatot alakítottam át folytonos hátizsák feladattá, aminek a jelentősége abban áll, hogy az energetikában általánosan használt „merit order” megoldással analóg megközelítést kaptam. Az értékelési szempontok mint költségek monetarizálva kerültek összevonásra a célfüggvény együtthatókban.

2. Többcélú optimalizálás

A második példában többcélú optimalizálással valósítottam meg parciális érzékenységvizsgálatot a szempontsúlyokra vonatkozóan. Az előállt eredmények rámutatnak az értékelési szempontok között fennálló fontossági kompromisszumok kiemelt szerepére.

3. Nemlineáris optimalizálás

A harmadiknak tárgyalt erőforrás elosztási feladatnál a piac telítettségét figyelembe vevő modell került kialakításra, ahol a matematikai felírás egy disztribúciós feladat konvex nemlineáris célfüggvényű eseteként lett megfogalmazva.

4. Értékelési szempontrendszer kialakítása

Az első három tömören vázolt mintafeladat célfüggvényeinek mindegyikében csupán a legfontosabb értékelési szempontok, a „főszempontok” kaptak szerepet. A negyedik szakaszban a főszempontokhoz kapcsolódó teljes szempontrendszer föltárásához ismertetek eljárást.

5. Értékelési szempontsúlyok meghatározása

Az utolsó téma a döntési szempontok rendszerezését és összevonását mutatja be komplex környezetben. A szempontok összevonásának feltételét a fontossági súlyok kialakítása teremti meg. Az egységes súlyozást az Analytic Network Process (ANP) módszernek a jelen problémához igazított formájával valósítottam meg.

2. Energetikai döntéstámogatási módszerek és a további felhasznált matematikai eszközök történeti áttekintése

Az energetika témakörét általános figyelem övezi a teljes társadalomban. Nagyobb energetikai beruházások gyakran gerjesztenek társadalmi konfliktusokat a pontatlanul megfogalmazott célok és sok esetben a döntési eljárás átláthatatlansága miatt. Doktori értekezésem fókuszában a hő és villamosenergia-termelés forrásösszetételéhez kapcsolódó optimalizálási feladatok szerepelnek. Az ideális forrásösszetétel, vagyis az energiahordozók kedvező arányának meghatározása fontos stratégiai és beruházási döntéseket igényelnek az energiafejlesztésben, lokális és globális szinten egyaránt. A döntési eljáráshoz kapcsolódó kiterjedt szempontrendszer meghatározása legalább annyira fontos, mint a matematikai leírás alapvető elemeinek, a peremfeltételeknek, illetve a célfüggvényeknek a pontos definiálása. A döntési szempontrendszer gondos kialakítása komoly kihívás az energetikai alkalmazásoknál, ezért a legtöbb tanulmány csupán a legegyszerűbben számszerűsíthető értékelési szempontra fókuszál modelljében, és monetarizált értékek összevonásával egységesített szempontrendszerrel dolgozik. A monetarizált megközelítés tisztán gazdasági leírás esetén alapvetően helyes lehet, azonban a hozzá kapcsolódó nagyfokú bizonytalanság csak körültekintő érzékenységvizsgálattal kezelhető. Ezekben az esetekben egy ügyesen kialakított, változtatható súlyokkal megvalósított, többcélú optimalizálás is elegendő az érzékenységvizsgálat elvégzéséhez. Globális stratégiai döntések esetén azonban, a jóval összetettebb szempontrendszer felhasználása miatt, a többszemponútú döntési modellek alkalmazása az általános. A többszemponútú döntési modelleknél alapvető elvárás a szempontok fontossági rangsorának kialakítása, mely az energetika területén nemzetközi szinten is hiányosan publikált, azonban átfogó hazai kutatás egyáltalán nem ismert a témában. A döntési szempontrendszerhez hasonlóan, a matematikai leírás peremfeltételei is sarokpontot jelentenek az energetikai modellek megalkotásánál, melyek nemcsak a megoldási módszerekre vagy a probléma léptékére vannak kihatással, hanem sok esetben életszerű, indirekt információkat kódolnak. Ilyen indirekt információk lehetnek például a termelési és fogyasztási alternatívák finom felbontású adatsorából kirajzolódó profilok. Munkámban a peremfeltételek definiálásakor éves adatsorokat használtam fel órás felbontásban, mely lehetővé tette a szezonális hatások, napi fogyasztási és termelési profilok figyelembevételét. Hazai energetikai rendszerek ilyen mélységű modellezése és az optimális forrásösszetétel többszemponútú elemzése szintén egyedülálló eredményeket nyújtott. A problémák

megoldásának informatikai hátterét optimalizálási feladatokhoz széleskörűen alkalmazható GAMS (General Algebraic Modeling System) [5] környezet biztosította. A program kódolását úgy valósítottam meg, hogy az adatbevitelre felhasznált szövegfájlok könnyen módosíthatók legyenek további érzékenységvizsgálati számítások elvégzéséhez.

A munkám során alkalmazott optimalizálási célfüggvények szinte minden esetben egyszerű lineáris kifejezésekkel írhatók le, így még a ciklikus futtatások esetén is hozzájárultak a gyors és pontos eredményekhez. Mivel értekezésemben minden fölvetett feladat valós energetikai probléma, így megoldásuknál gondosan összegyűjtött, hivatalosan elérhető adatokból indultam ki. Az alkalmazott matematikai módszerek bemutatása mellett az eredmények diszkutálása is kiemelt helyet kapott.

2.1. Energetikai modellekhez kapcsolódó optimalizálási eljárások általános ismertetése

Munkám első részének központi témája a lokális vagy regionális forrásösszetétel meghatározása a villamos és hő szektorban. A forrásösszetétel meghatározása egy klasszikus operációkutatási feladatnak tekinthető, ahol korlátozottan rendelkezésre álló erőforrások optimális szétosztása a cél. Az operációkutatás eszközeinek kifejlesztése a második világháborúhoz köthető, ahol a szövetséges hatalmak katonai irányítása sikerrel alkalmazott matematikai módszerekkel előkészített döntéseket. A háború után látványos fejlődésnek induló matematikai témakör neve hordoz még emlékeket a korabeli felhasználási területről, azonban ma már nehéz olyan tudományágot találni, ahol ne alkalmaznák eredményesen a kidolgozott modelljeit. Az operációkutatás legáltalánosabban használt módszere a lineáris programozás (lineáris optimalizálás, LP feladat), melynek alapfeladatában egy lineáris célfüggvény optimumát határozzuk meg lineáris egyenletek és előjelkorlátozó feltételek figyelembevételével.

$\min(c^T x)$ feltéve, hogy $Ax = b$ és $x \geq 0$,

ahol $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $c, x \in \mathbb{R}^n$, $b \in \mathbb{R}^m$

A vázolt standard feladatban természetesen az n komponensű x döntési változó és c célfüggvény együtthatóival fölírt lineáris függvény maximumát is kereshetjük a

megvalósítható tartomány pontjain. A megvalósítható tartomány (L) a döntési változók korlátozására felírt m darab lineáris $Ax = b$, és az n darab előjelkorlátozó $x \geq 0$ feltétel által meghatározott konvex poliéder. Az esetek többségében a matematikailag formalizált gyakorlati problémák a korlátozó feltételek egyenlőségei helyett egyenlőtlenségeket is tartalmazhatnak. Így kapjuk az általánosabb alakot:

$$\max(c^T x) \quad \text{feltéve, hogy } Ax \leq b \quad \text{és } x \geq 0,$$

$$\text{ahol } A \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad c, x \in \mathbb{R}^n \quad \text{és } b \in \mathbb{R}^m$$

vagy akár a fölírt probléma duálját, mely az érzékenységvizsgálatok során nyújthat támpontot, és speciális esetekben leegyszerűsítheti a számításokat.

$$\min(b^T y) \quad \text{feltéve, hogy } A^T y \geq c \quad \text{és } y \geq 0,$$

$$\text{ahol } A \in \mathbb{R}^{m \times n}, \quad c \in \mathbb{R}^n \quad \text{és } y, b \in \mathbb{R}^m.$$

Az ilyen jellegű kifejezések könnyen egymásba alakíthatóak, azonban a primál és a duál feladatok önmagukban is tartalmazhatnak a leírtakkal ellentétes relációkat. A korlátozó feltételek egyenlőtlenségeinél a standard alakot csak újonnan felvett $z \in \mathbb{R}^n$, $s \in \mathbb{R}^m$ eltérés változókkal tudjuk garantálni, míg az előjel korlátozatlan változókat két új, nem negatív változó különbségével állítjuk elő. Természetesen mindkét átalakítás növekvő változó számmal jár.

$$\max(c^T x + 0^T s) \quad \text{feltéve, hogy } Ax + s = b \quad \text{és } x, s \geq 0, \quad \text{vagy}$$

$$\min(b^T y - 0^T z) \quad \text{feltéve, hogy } A^T y - z = c \quad \text{és } y, z \geq 0.$$

A standard alakra hozott lineáris optimalizálási probléma megoldására George Dantzig 1947-ben dolgozta ki a szimplex algoritmust, mely az esetek többségében nagyon hatékonyan jut el a végső eredményhez. A szimplex algoritmus során a megvalósítható tartomány konvex poliéderének élei mentén araszolunk báziscserékkel (pivotálás) az optimális megoldás felé. Az algoritmus alkalmazásának előfeltétele a megvalósítható tartomány egy lehetséges kiindulási pontjához tartozó bázismegoldás meghatározása. A standard alakból a legtöbb esetben az eltérésváltozókkal fölírt triviális bázismegoldás kiolvasható: $x = 0$ és $s = b \geq 0$. Amennyiben az eltérés változókkal előállított $N \in \mathbb{R}^{m \times m}$ mátrix ($n_{ij} = s_i$ ha $j = i$ és $n_{ij} = 0$ ha $j \neq i$, $i, j \in \overline{1; m}$) oszlopvektorainak lineáris kombinációjával a b vektor nem állítható elő, akkor a kétfázisú szimplex módszerrel határozhatjuk meg a kezdő bázist. A kétfázisú szimplex módszer esetén mesterséges változók bevezetésével úgy alakítjuk át az

alapfeladatot, hogy az új változók minimalizálásával az eredeti probléma egy lehetséges bázisát kapjuk. A kezdő bázis ismeretében báziscserékkel lépésről lépésre javítjuk a célfüggvény értékét az optimális megoldásig. Sajnos léteznek olyan degenerált feladatok, ahol a báziscserénél a célfüggvény érték stagnál és az algoritmus végtelen ciklusba sodródik. Az ilyen ciklizálás kikerülhető Bland által 1977-ben bevezetett legkisebb index módszerével, ahol mindig a legkisebb indexű változó élvez előnyt a bázisba és onnan kilépéskor [6]. Bland roppant egyszerű ötlete garantálja a szimplex algoritmus végességét, a gyakorlati problémáknál az optimális megoldás előállításának lépésszáma pedig szinte minden esetben a változók számának polinomiális függvénye. Speciálisan fölépített problémáknál azonban exponenciális lépésszám is lehetséges, melyet jól demonstrál a Klee és Minty-féle példa feladat 1970-ből [7]. A 80-as években több exponenciális feladatot is publikáltak, de ezek is kifejezetten unikális problémák és csupán jól kiválasztott kezdőbázis esetén térnek el a megoldásukhoz szükséges lépésszám tekintetében a polinomiálistól [8]. Az exponenciális problémák ritkaságát jól szemlélteti Fukuda és Namiki 1994-es munkája, amelyben arra az eredményre jutottak, hogy egy adott problémát véletlenszerűen kiválasztott kezdőbázisból megoldva, az iterációk várható száma minden esetben polinomiális [9]. Munkájuk eredményeként állítható, hogy minden életszerű probléma a szimplex algoritmus tetszőleges változatával polinomiálisan megoldható. Ezzel azonban a 70-es években, Klee és Minty-féle példa kapcsán fölvetett kérdés, vagyis, hogy lehet-e polinomiális algoritmust készíteni lineáris optimalizálási feladatokhoz, még nem lett lezárva. A kérdésre megnyugtató választ Hacsijan adta meg az 1979-ben publikált munkájában, ahol a nemlineáris programozási feladatokhoz kidolgozott ellipszoid módszert alkalmazta lineáris programozási feladatok esetén, és bizonyította az algoritmus polinomiális tulajdonságát [10]. Mivel az ellipszoid módszert a gyakorlati alkalmazások során nagyon lassúnak bizonyult, így a fejlesztések irányát Karmarkar 1984-ben kidolgozott belsőpontos módszere jelentette, amelyben az iterációs lépések során a lehetséges megoldások egy centrális pontjának projektált képével közelítünk az optimális megoldás felé [11]. A mai általánosan használt optimalizálási szoftverek kivétel nélkül, nagyon eredményesen, néhány lépésben oldják meg az exponenciális vagy degenerált feladatokat is, így biztosan állítható, hogy bennük a fejlett szimplex módszerek mellett a belsőpontos algoritmusok is kódolásra kerültek. Munkámban minden bemutatásra kerülő probléma GAMS/CPLEX és NLPEC megoldó algoritmussal került kiszámolásra, saját fejlesztésű programkóddal, amellyel a változók több ezres számánál sem ütköztem korlátokba.

A tárgyalásra kerülő problémák szinte kivétel nélkül energetikai erőforrások optimális szétosztását célozzák meg, ahol a termelési és fogyasztási oldal dinamikus egyensúlya alapvető követelmény, így a lineáris optimalizálás egy speciális területére vezetnek, melyet a disztribúciós feladatok témakörébe sorolunk [12]. Ugyan a disztribúciós feladatok általános alakjai megoldhatók szimplex módszerrel, azonban a megoldásukra kidolgozott algoritmusok jóval hatékonyabbak, rajtuk keresztül a probléma megfogalmazása és értelmezése is egyszerűbbé válik. Munkámban a disztribúciós feladatok egy szűk csoportját használom fel, a fix költséggel rendelkező szállítási feladat folytonos relaxáltját. A probléma matematikai leírása során az x_{ij} változók és a c_{ij} célfüggvény együtthatók megadása táblázatos formában megszokott, kiegészítve a p_i beépített teljesítmények és s_i fixköltség együtthatók felírásával, ahol az $i \in I$ a kínálati és a $j \in J$ keresleti elemek halmaza. Ezek alapján a probléma általános alakja a következő:

$$\min(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m s_i p_i y_i)$$
 feltéve, hogy teljesülnek a $\sum_{j=1}^n x_{ij} = g_i$ kínálati és a $\sum_{i=1}^m x_{ij} = d_j$ keresleti, illetve a $x_{ij} \leq p_i y_i$ teljesítmény feltételek minden $i \in I$ és $j \in J$ esetén. Az $x \geq 0$ és $C, X \in \mathbb{R}^{m \times n}$, továbbá $d \in \mathbb{R}_+^n$ és $g \in \mathbb{R}_+^m$ nemnegatív vektorok, és $y_i \in \{0, 1\}$ diszkrét változók, ahol a relaxált esetben $y_i \in [0, 1]$.

Amennyiben a kínálat és keresleti feltételek nem egyenlőségek, tehát a feladatunk nem kiegyensúlyozott, akkor az első lépésben fiktív keresleti vagy termelési pontok és büntető költségek bevezetésével alakítjuk át a problémát. A kiegyensúlyozott feladat megoldására kidolgozott disztribúciós módszer első lépésében egy lehetséges bázis felírása a cél, majd a továbbiakban báziscserékkel egyre kedvezőbb célfüggvény értékekhez jutni. A lehetséges bázis meghatározásának legegyszerűbb módja az x_{ij} változók átlós feltöltése ($i = j$) mindig a szigorúbb kínálati vagy keresleti feltétel alapján. Hatékonyabb eljárás adódik a célfüggvény együtthatók c_{ij} értékeinek figyelembevételével, ahol minden j oszlopból a minimális költségű x_{ij} változót töltjük fel a szigorúbb felsőkorlátig. Nagyméretű feladatok esetén a minimális költség mohó algoritmus helyett a Vogel módszerrel [13] kerülhetünk az optimális megoldás közelébe, így csökkentve le a szükséges báziscserék számát. A disztribúciós módszer erőssége azonban elsősorban abból adódik, hogy kihasználja az A mátrix speciális szerkezetét. Az A mátrix oszlopvektorainak két komponense 1, az összes többi 0 értékű. Az $n+m$ darab feltétel közül az egyik a kiegyensúlyozottság miatt elhagyható, ami $n+m-1$ számú bázisoszlopot eredményez. A kiindulásnál kedvezőbb bázisrendszert cserékkel érjük el, úgy, hogy kiválasztjuk a nem bázis együtthatók közül a legnagyobb pozitív, aktuális értékkel

rendelkezőt. Ezen új báziselemmel az X mátrixban egy hurok létesül, melyből a legkisebb x értékkel rendelkező bázist léptetjük ki a kínálati és keresleti feltételek teljesülése mellett. A feltételeket úgy garantáljuk, hogy a hurok szakaszainak végpontjainál ellenkező előjellel adjuk hozzá a kiléptetett x értéket. Ezzel együtt jár, hogy a belépő és kilépő bázis között páratlan sok végpontnak kell elhelyezkednie. Fontos azonban szót ejtenünk a nem bázis együtthatók aktuális értékének meghatározásáról is. Az egy sorral csökkentett A mátrix bázisoszlopaiból előállítjuk a $B \in \mathbb{R}^{(n+m-1) \times (n+m-1)}$ és a nem bázis oszlopaiból az $N \in \mathbb{R}^{(n+m-1) \times (nm-n-m+1)}$ mátrixot. A $c, x \in \mathbb{R}^{nm}$ vektorokat kettévágva a bázisoszlopokhoz tartozó $c_B, x_B \in \mathbb{R}^{n+m-1}$ és a nem bázisoszlopokhoz tartozó $c_N, x_N \in \mathbb{R}^{nm-n-m+1}$ vektorokra az eredeti kifejezés átalakul $Bx_B + Nx_N = b$ feltételekre és a $c_B^T x_B + c_N^T x_N = z$ minimalizálandó célfüggvényre. Az első egyenletet balról a $c_B^T B^{-1}$ kifejezéssel szorozva, ahol az invertálhatóságot a B mátrix rangja garantálja, valamint a második egyenletből kiküszöbölve a $c_B^T x_B$ tagot, megkapjuk a szimplex módszer gyakorlati megvalósításánál általánosan használt összefüggést:

$$z + (c_B^T B^{-1} N - c_N^T) x_N = c_B^T B^{-1} b .$$

Ebből a $(c_B^T B^{-1} N - c_N^T)$ tényező az aktuális nem bázisváltozók célfüggvény együtthatója, mely a szimplex módszerben fontos szerepet játszik, hiszen a legnagyobb pozitív értékhez tartozó oszlopvektort kell bevonni a bázisrendszerbe. A nem bázisváltozók célfüggvény együtthatóinak kiértékelésénél a mátrix invertálás a leginkább műveletigényes lépés. A szállítási feladatnál azonban, ahogy az korábban említésre került, az oszlopvektoroknak csupán két komponense 1 az összes többi 0 érték mellett. Ezt kihasználva a $c_B^T B^{-1}$ szorzat komponensei az $n+m-1$ számú bázisoszlop szorzattal előálló egyenletrendszeréből könnyen meghatározhatók. Az aktuális, nem bázis változókhoz tartozó célfüggvény együtthatók ismeretében a báziscserét megvalósítjuk. Az algoritmust addig folytatjuk míg pozitív együttható föllelhető. A röviden vázolt disztribúciós eljárás inkább csak szemléltetésnek tekinthető, tömör összefoglalása csupán arra szolgált, hogy az energetikai alkalmazásoknál a fogalmak és gondolatmenetek jól követhetők maradjanak. Meg kell említeni azonban, hogy a dolgozatomban tárgyalt disztribúciós feladatok feltételrendszere és célfüggvénye is eltérnek a klasszikus szállítási feladattól, ami különösen igaz a harmadik tézispontban megfogalmazott, a piac telítettségét figyelembe vevő problémára, mely konvex nemlineáris célfüggvényre vezetett. A fölépített modell célfüggvényében jelentkező kvadratikus tagok kezelésére eredményesen alkalmazható a Wolfe-módszer [14]. A módszer olyan nemnegatív változókkal fölírt kvadratikus programozási feladatra alkalmazza a Kuhn-Tucker feltételeket [15], ahol a

konvex célfüggvény miatt garantálható a feltételeknek eleget tevő megoldás optimális volta. Az eljárás megértéséhez a feltétel nélküli többváltozós függvény optimalizálásáig kell visszatekintenünk. Amennyiben $f(x_1 \dots x_n)$, $(x_1 \dots x_n) \in \mathbb{R}^n$ függvényünk deriválható, az optimális megoldás biztos, hogy stacionárius pont is egyben, tehát $\frac{\partial f(x_1 \dots x_n)}{\partial x_i} = 0$, $\forall i \in \overline{1; n}$. Ezt kihasználva, egyenlőségi feltételekkel kiegészített deriválható függvény esetén,

$$\min z = f(x_1 \dots x_n),$$

$$g_1(x_1 \dots x_n) = b_1, \dots, g_m(x_1 \dots x_n) = b_m$$

az optimális megoldás megkereséséhez bevezetjük a Lagrange-függvényt:

$$L(x_1 \dots x_n, \lambda_1 \dots \lambda_m) = f(x_1 \dots x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i (b_i - g_i(x_1 \dots x_n)),$$

ahol a feltételeket a λ_i Lagrange-változók segítségével építjük be a célfüggvénybe, és így azt a feltétel nélküli esetre vezetjük vissza. Amennyiben a Lagrange-függvénynek létezik stacionárius pontja, az az eredeti feladat megoldását is nyújtja. Hasonló gondolatmenettel jutunk a Kuhn-Tucker feltételekhez abban az esetben, ha g_i egyenletek helyét egyenlőtlenségek veszik át. A stacionárius pont feltételei alapján az x_j változók szerinti parciális derivált:

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x_j} - \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial g_i(x)}{\partial x_j} = 0, \quad j \in \overline{1; n}, \text{ illetve a } \lambda_i \text{ változók szerinti parciális deriváltak alapján:}$$

$\lambda_i (b_i - g_i(x)) = 0$, $i \in \overline{1; m}$ feltéve, hogy $\lambda_i \geq 0$. Ahhoz, hogy a Kuhn-Tucker feltételek az optimális megoldáshoz vezessenek az f_i és a g_i függvényekre teljesülniük kell bizonyos regularitási feltételeknek, mint például minimalizálás esetén a konvexitás. A Wolfe-módszerhez kvadratikus programozási feladat esetén a Kuhn-Tucker feltételek alkalmazásával jutunk. A megoldás során kihasználjuk a kvadratikus célfüggvény konvexitását, valamint azt, hogy a parciális deriváltak lineáris függvényeket eredményeznek. Lineáris korlátozó feltételek esetén a minimum egyszerűen kétfázisú szimplex módszerrel meghatározható.

2.2. Döntéstámogatáshoz kapcsolódó matematikai eszközök ismertetése

A disztribúciós módszer alkalmazása roppantul széleskörű, főleg gráfelméleti területen számtalan változata van, azonban munkámban ezekre már nem térek ki, helyet biztosítva a döntéstámogatáshoz kapcsolódó matematikai eszközöknek. A döntéshozatal legnagyobb nehézsége az, amikor több, sokszor egymásnak ellentmondó szempontnak kell eleget tennünk egy probléma megoldása során. A munkámban érintett valamennyi feladat esetén több szempont alapján kiválasztott optimális megoldás meghatározása a cél. A témakör matematikai leírását a többcélú programozáshoz soroljuk, ahol az eddig tárgyaltaktól annyiban térünk el, hogy több cél egyidejű érvényesítését valósítjuk meg. Továbbra is lineáris célfüggvényeknél maradva, az alap problémánk k darab egyenlettel felírt optimum meghatározásává alakul: $\min(f_i(x))$, ahol $f_i(x) = (c_i^T x)$ $x \in L$ $i \in \overline{1; k}$. Sajnos a legtöbb esetben nem létezik abszolút optimum, vagyis a lehetséges megoldásoknak olyan $x \in L$ eleme, mely az összes függvény szerint a legjobb. A lehetséges megoldások összehasonlítására több célfüggvény esetén a hatékonyság fogalmát használjuk. Azt mondjuk, hogy $p, d \in L$ megoldások közül p hatékonyabb, ha $f_i(p) \leq f_i(d)$ $i \in \overline{1; k}$ és létezik $l \in \overline{1; k}$ $f_l(p) < f_l(d)$. Ezek alapján definiálható egy hatékony pont, vagyis egy efficiens megoldás, melyet egyben Pareto-optimális pontnak is nevezünk, amin túl már egyik célfüggvény értéket sem javíthatjuk csak a többi kárára. Lényeges tehát, hogy az efficiens megoldás nem kell, hogy bármelyik célfüggvény optimális megoldása legyen. A gyakorlati problémákat tekintve azonban, a megfogalmazott célok igen lényeges tulajdonsága, hogy fontossági rangsorba rendezhetőek. Preferálható célfüggvények esetén két általánosan használt módszer ismert, a szekvenciális, illetve a súlyozásos optimalizálási eljárás. A szekvenciális módszernél a legfontosabbnak tartott szempont alapján határozzuk meg az optimális L_1 megoldásokat, majd az L_1 halmazon a rangsorban következő szempont szerint keressük ismét az optimális megoldásokat. A megoldás halmazok egymásba ágyazódnak amennyiben minden feladatnak van véges optimuma $L \supseteq L_1 \dots \supseteq L_i$ $i \in \overline{1; k}$, és $x \in L_i$ a szekvenciális módszer optimuma, amennyiben $L_{i+1} = \emptyset$ és $i < k$, vagy $i = k$. A súlyozásos eljárás alapötlete az, hogy lineáris kombinációval egy célfüggvénnyé integrálja a különálló célokat $F(x) = \sum_{i=1}^k \lambda_i f_i(x)$, ahol az együtthatókat $\lambda_i \in (0; 1]$ a célok fontossági súlya adja. Mivel az $f_i(x)$ függvények eltérő értékkészlete erősen torzíthatná a szempontsúlyokat, ezért szükség van a célfüggvények uniformizálására, $\bar{f}_i(x) = \frac{f_i(x) - m_i}{M_i - m_i}$,

$M_i = \max_{x \in L} \{f_i(x)\}$ és $m_i = \min_{x \in L} \{f_i(x)\}$. Munkámban kivétel nélkül szempontsúlyokkal dolgoztam, így érdekes kitérnünk arra kérdésre, hogy a súlyozásos módszerrel egy célfüggvénnyé alakított probléma megoldása mennyire hatékony. Steuer [16] nyomdokain haladva könnyű belátni, hogy egy pozitív szempontsúlyokkal felírt $0 < \lambda_i, i \in \overline{1; k}$ többcélú programozási feladat súlyozásos módszerrel meghatározott optimális megoldása minden esetben efficiens, mi több az állítás tetszőleges célfüggvényre kiterjeszhető. Ezzel eljutottunk a többcélú optimalizálási módszerek egyik legnagyobb nehézségéhez, amely az eltérő szempontok segítségével fölírt célfüggvények fontossági rangsorának kialakítása. A döntési szempontok rendezésére számos technika alkalmas (Polano, Borda, Bernardo módszer vagy akár a SWOT elemzés [17]), melyek a szekvenciális optimalizálási módszerekhez illeszkednek. Azonban a szekvenciális optimalizálás esetén nehéz garantálni a döntésben résztvevő szempontok halmazát, vagyis a sorrendben hátrébb sorolt szempontok kiszorulhatnak az értékelésből. Munkámban ezért az általánosabban használható súlyozásos módszerrel dolgoztam. A pontos matematikai leíráshoz először is a döntési szempontok halmazát kell összegyűjtenünk, melyek segítségével a célfüggvények definiálhatók. Az értékelési szempontok halmazával kapcsolatosan a legfontosabb elvárásunk az, hogy a döntési probléma minden vetületét ölelje fel. A teljességen túl a legtöbb döntéstámogató módszer megköveteli a szempontok függetlenségét, melynek garantálása esetén a szempontok csoportosíthatóak és akár hierarchikus szerkezetbe rendezhetők. A teljesség biztosítása igen nehéz elvi kérdés, de a függetlenség vizsgálatára a negyedik tézispontban ismertetem az általam javasolt és alkalmazott eljárást.

A dolgozatomban bemutatásra kerülő alkalmazás, egy országos adatsorra támaszkodó felmérés kiértékelését tárgyalja, így ebben a fejezetben a fontossági szempontsúlyok meghatározására elsősorban széleskörű mintavétel feldolgozására alkalmas technikákra fókuszálok, mellőzve a csekély számú szakvéleményre épülő eszközöket, mint a szakértői becslést vagy többlépcsős Delphi módszert [18]. A fontossági szempontsúlyok meghatározására alkalmazott legelterjedtebb módszer a páros összehasonlítás módszere. Az eljárás alapelve az, hogy a rangsorolási problémát elemi egységekre bontjuk, feltételezve, hogy két szempont fontosságának aránya könnyebben meghatározható. Az n szemponthoz kapcsolódó összehasonlítások eredményét táblázatba rendezve kapjuk a páros összehasonlítás mátrixot $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, ahol a_{ij} értéke megadja, hogy az i -edik szempont hányszor fontosabb, mint a j -edik. Amennyiben ismert lenne az összes $i; j \in \overline{1; n}$, $0 < w_i, 0 < w_j$ szempontsúly, akkor az $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$, $a_{ii} = 1$ összefüggésekkel meghatározott mátrix elemekre

teljesülne a reciprok $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ és a konzisztencia $a_{ij} = a_{ik}a_{kj}$ tulajdonság. Könnyen belátható, hogy egy pozitív reciprok mátrix konzisztenciájának szükséges és elégséges feltétele a legalább 2×2 -es aldeterminánsok nulla értéke. Ebben az esetben a mátrix rangja 1 lesz, vagyis az első szempont fontosságának értékét rögzítve a további súlyok az arányszámok ismeretében kiszámolhatóak. Más irányból megközelítve, a pozitív reciprok mátrix tulajdonságait tanulmányozva hasonló és a későbbiekben fontos eredményekre juthatunk. Válasszuk meg a szempontsúlyokat úgy, hogy teljesüljön a $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ egyenlőség. Ekkor a mátrixunk minden oszlopát egyre normálva azonos oszlopvektorokat kapunk, ami a rang értékének egyszerű következménye. Bármely oszlop i -ik normált eleme, az eredeti i -ik szempontsúlyt adja vissza $b_{ij} = \frac{\frac{w_i}{w_j}}{\frac{w_1}{w_j} + \frac{w_2}{w_j} + \dots + \frac{w_n}{w_j}} = w_i$. Az oszloponként normált B páros összehasonlítási mátrixra igaz lesz, hogy a $w^T = (w_1, \dots, w_i, \dots, w_n)$ szempontsúlyokból álló oszlopvektor jobboldali sajátvektora lesz a $\lambda = 1$ sajátérték mellett, vagyis a $Bw = \lambda w$. További érdekesség, hogy a B mátrix tetszőleges hatványa önmaga, azaz $B^k = B$, $k \in \mathbb{N}$. A gyakorlati problémákban azonban, pont a mátrix elemek ismeretében kell a szempontsúlyokat meghatározni úgy, hogy a konzisztencia kritérium az esetek többségében csak részben teljesül. Inkonzisztens páros összehasonlítási mátrixnál a szempontsúlyok kiszámításának általánosan használt módja a Saaty által 1980-ban publikált sajátvektor módszer [19], ahol a maximális sajátértékhez tartozó sajátvektor $Aw = \lambda_{max} w$, vagyis a Perron vektor, 1-re normált komponensei adják a w_i súlyokat, ami tökéletes összhangban van a konzisztens pozitív reciprok mátrixszal kapcsolatos tapasztalatokkal. Egy páros összehasonlítással megvalósított, széleskörű mintavétel esetén igen lényeges olyan szűréseket végezni, mely alapján a bizonytalan, figyelmetlen vagy önellentmondó válaszok kiszűrhetők. Így került bevezetésre a következetlenségi index $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$ és a következetlenségi hányados $CR = \frac{CI}{RI}$, ahol az RI értéke a véletlenszerűen generált reciprok mátrixok átlagos következetlenségi indexe. A következetlenségi hányados értékére a $CR \leq 0,1$ általánosan elfogadott küszöbszám, de értékét a mátrix méret és az előre definiált összehasonlítási szorzók befolyásolhatják. A szempontsúlyok meghatározására a sajátvektor módszer mellett igen elterjedtek a távolságminimalizáló eljárások. Közülük a legkisebb négyzetek módszerét

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} - \frac{w_i}{w_j} \right)^2, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \in \mathbb{R}^+ \text{ és a De Jong (1984) által javasolt [20]}$$

logaritmikus legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam

$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\log a_{ij} - \log w_i + \log w_j)^2, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \in \mathbb{R}^+$. A három eljárás nemcsak a numerikus megvalósításukban tér el egymástól, de inkonzisztens válaszoknál eredményükben is. A kiszámolt szempontsúlyok közötti árnyalatnyi különbségek azonban egy átfogó érzékenységvizsgálat kiindulási pontját nyújthatják. Természetesen az összehasonlítási mátrixban megmutatkozó következetlenséget, a távolságminimalizáló eljárások esetén a sajátértékek fölhasználása nélkül érdemes újradefiniálni. Erre több javaslat is született, a válaszokhoz legközelebb fekvő konzisztens megoldástól való eltérés osztályozásával. Így juthatunk el a Koczkodaj-féle inkonzisztencia indexhez (CM), ami alatt az összehasonlítási mátrix tetszőleges triádjára a konzisztens hármas huroktól vett eltérések maximumát értjük

$$CM(A_{n \times n}) = \max_{i,j,k \in \overline{1,n}; i \neq j \neq k} \left\{ \min \left(\frac{1}{a_{ki}} \left| a_{ki} - \frac{a_{ji}}{a_{jk}} \right|; \frac{1}{a_{ji}} \left| a_{ji} - a_{jk} a_{ki} \right|; \frac{1}{a_{jk}} \left| a_{jk} - \frac{a_{ji}}{a_{ki}} \right| \right) \right\} \quad [21].$$

Az inkonzisztencia igen praktikus megközelítést nyújtja a legkisebb négyzetek módszeréhez Chu - Kalaba és Spingarn munkájában, illetve a logaritmikus legkisebb négyzetekhez Crawford és Williams által bevezetett hibaérték felhasználás [22][23]. Több tanulmány foglalkozott a különböző inkonzisztencia indexek tulajdonságaival, melyet elsősorban a páros összehasonlítás lehetséges arányszámai és a mátrix méret befolyásolhat, [24] azonban az általam vizsgált 4x4 mátrixok esetén a négy tárgyalt inkonzisztencia index, megfelelő küszöbszámok alkalmazásával egyenértékűvé tehető. A páros összehasonlítás alkalmazásánál mérlegelnünk kell a teljességet garantáló szempontrendszer részletességét, hiszen már kis számú n szempont esetén is az $\frac{n(n-1)}{2}$ összehasonlítás megterhelő lehet egy társadalmi felmérésnél, és hiányos vagy inkonzisztens válaszokat eredményez. Az összehasonlítások számát hierarchikus szempontrendszerrel, vagy akár hiányos páros összehasonlítási mátrix megengedésével is korlátozhatjuk. A hierarchikus struktúrát bináris fa rendszerbe formázva az összehasonlítások számát drasztikusan, megközelítőleg n -re csökkenthetnénk, azonban a gyakorlati problémáknál a fogalmak csoportosítása nem alakítható ki önkényesen. Az összehasonlítások számának csökkentésére a leginkább kézenfekvő megoldás természetesen a kérdések kihagyása. A nem teljesen kitöltött összehasonlítási mátrix alkalmazásánál minimálisan $n - 1$ válasszal tudjuk garantálni az összefüggőséget. Ez úgy szemléltethető, hogy a szempontokból, mint csúcsokból és az összehasonlításokból, mint élekből gráfot készítünk, ahol a csúcsokat hosszú összehasonlítási láncá fűzzük. A szempontsúlyok ekkor

egyértelmű, de nagyon bizonytalan eredményekre vezethetnek. Az összehasonlítások számának korlátozására kifejlesztett módszereknél érdemes megemlíteni Jafar Rezaei által 2015-ban kifejlesztett Best-Worst Method (BWM) [25] eljárást, ahol a legkevésbé és a leginkább fontos szempontok előismeretével jelentősen csökkenthető a rangsorolási lépések száma. A módszer alapelve az, hogy a kiemelt két szélsőséges szemponthoz viszonyítva határozzuk meg a többi szempont fontossági súlyát. A kérdések alapján kialakított hiányos összehasonlítási mátrix kitöltöttségére nincs általánosan megkövetelt arányszám, azonban például a Koczkodaj-féle inkonzisztencia index akár hiányos állapotában is meghatározható. A nem teljesen kitöltött összehasonlítási mátrix kiértékelésénél a hiányzó adatok pótlását az inkonzisztencia index minimalizálása mellett valósítjuk meg. Ebből kiindulva, a hiányos mátrix d darab diagonális felett levő ismeretlen $x \in \mathbb{R}_+^d$ értékének meghatározását Shiraishi, Obata és Daigo $\min_{x>0} \lambda_{max}(A(x))$ sajátérték minimalizálási feladatként fogalmazta meg [26][27]. Belátható, hogy a felírt sajátérték minimalizálási feladat akkor és csak akkor vezet egyértelmű optimális megoldásra, ha a nem teljesen kitöltött páros összehasonlítás mátrixot reprezentáló gráf összefüggő. Ekkor a változók exponenciális paraméterezésével a sajátérték minimalizálási probléma egy szigorúan konvex optimalizálási feladattá transzformálható [28].

Az eddig tárgyalt páros összehasonlítási mátrix kétségtelenül igen hatékony eszköze a szempontok súlyozásának és a döntéstámogatásnak, azonban a szempontrendszer struktúrájának ismerete elengedhetetlen a helyes alkalmazásához. Ahogy korábban említésre került, a nagyszámú összehasonlítás miatt megkerülhetetlen a szempontok csoportosítása, egy struktúra kialakítása. A legegyszerűbb dolgunk akkor van, ha sikerül diszjunkt szempont halmazokat különböző főszempontok alá csoportosítanunk. Ekkor minden csoportban meghatározzuk a szempontok súlyát, majd a kialakult hierarchikus rendszerben a fa struktúra elemeinek értékelése a saját és a szülő elemek szempontsúlyainak szorzataként áll elő. A rangsorolásnak ezen technikáján alapszik az AHP (Analytic Hierarchy Proces) modell [29]. Előfordulhat azonban, hogy nem találunk olyan főszempontokat, melyek mentén diszjunkt halmazokra szabhatjuk szempontrendszerünket, és így az előbb vázolt eljárás nem alkalmazható, hiszen ekkor a közös szempontok túlértékeltté válhatnak. Az ilyen felderítetlen kapcsolatú szemponthalmazok alapján történő értékelésre lett kifejlesztve 2004-ben, T. L. Saaty által az ANP (Analytic Network Proces) modell [30]. Az ANP módszerben az értékelési szempontokat az AHP modellhez hasonlóan a természetük szerint igyekszünk csoportosítani, azonban hálószerűen, a csoportok között is megvalósítunk összehasonlításokat. Ezzel azonban jelentősen nem távolodtunk még el a hierarchikus megközelítéstől, hiszen ott is végezhetünk

állapotba k lépés után egy sztochasztikus folyamat során. Az összehasonlítási mátrix elemeinek jelentése ezzel párhuzamosan az lesz, hogy a lehetséges k hosszúságú összehasonlítási láncokban mennyivel mutatkozik fontosabbnak a j szempont az i -nél. Az oszloponként normált B konzisztens összehasonlítási mátrixnak erre a tulajdonságára már korábban felfigyeltünk, amikor a B megfelelő elemeinek a fontossági arányokat választottuk és a hatványozás során ezek értéke már nem változott: $B^k = B$, $k \in \mathbb{N}$. Amennyiben tetszőleges hosszúságú láncra vesszük a fontossági arányok átlagos értékét, azzal eljutunk az összehasonlítási mátrix Cesàro összegéig. A következő néhány tételben figyelemmel kísérhető, ahogy összeér a Perron vektoron alapuló és a gráfelméleti megfontolásokra épülő szempontsúly meghatározás. A gondolatmenet követéséhez definiálok egy A mátrix $\rho(A)$ spektrálsugarának fogalmát, ami a sajátértékek abszolút értékének maximumával azonos. A további fogalmak tisztázásához fontos rögzíteni, hogy az első lépések során, csupán a hatványmátrix elemek pozitív vagy nulla értéke lesz döntő számunkra. Ez azért is lényeges, mert a szempont súlyok meghatározhatóságának szükséges feltétele az összehasonlítási, irányított gráf összefüggősége. Ez azt jelenti, hogy a gráf tetszőleges i csúcsából vezet út a j -edikbe, vagyis az összehasonlítási mátrix irreducibilis, így bármely a_{ij} eleméhez létezik olyan k hatványkitevő amire $a_{ij}^{(k)} > 0$. Az irreducibilitás mellett igen fontos a gráf primitív tulajdonsága, vagyis meghatározható-e egy k természetes szám, amelyre létezen bármely két csúcs közötti k hosszúságú út. Vagyis a páros összehasonlítási mátrixban $\exists k \in \mathbb{N}$, hogy $\forall i, j \in \overline{1; n}$ esetén $a_{ij}^{(k)} > 0$. Egy primitív mátrix aperiodikus tulajdonságú, ha $k = 1$. A definíciók ismeretében könnyen felismerhető, hogy minden primitív mátrix irreducibilis is egyben, ennek ellenére, mint egymásra épülő tulajdonságokat külön-külön vizsgálom az alkalmazások során. Munkámban az SM mátrix feldolgozása során öt fontos tétel eredményére támaszkodom, melyekről bizonyítás nélkül tesztek említést. Ezek különböző kiindulási mátrixokra vonatkoznak azonban szoros kapcsolatban állnak a nemnegatív mátrixok sajátértékeiről megfogalmazott Perron-Frobenius tétel egy állításával.

1. Tétel. (Perron-Frobenius) [31, 667. oldal] $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ irreducibilis nemnegatív mátrix spektrálsugara pozitív $r = \rho(A) > 0$ és r egyszeres sajátértékhez pontosan egy p pozitív sajátvektor létezik (Perron vektor), azaz $Ap = rp$, melyre $\sum_{i=1}^n p_i = 1$.

Itt érdemes megfigyelni azt az egyszerű következményt, hogy amennyiben egy irreducibilis nemnegatív mátrix minden sorának vagy oszlopának az összege megegyezik egy d számmal, akkor $r = d$, hiszen a Perron vektort csupa egy komponensű vektornak választva $p = e$, a

sajátérték egyenlet $Ae = de$ ($e^T A = e^T d$) könnyen teljesíthető. Az e pozitív sajátvektor skalárszoros erejéig meghatározott. Ezek alapján egy sztochasztikus, irreducibilis és nemnegatív mátrixnak a sajátértéke mindig $r = 1$ lesz.

Az SM mátrix feldolgozásának igen lényeges pontja a limit mátrix meghatározása, ahol a mátrix hatvány értékét keressük, a hatványkitevő végtelenben vett határértékénél. A határérték létezésének feltételét a spektrálsugárral fogalmazhatjuk meg legkönnyebben:

2. Tétel. [31, 630. oldal] Egy $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mátrixhoz $\exists D \in \mathbb{R}^{n \times n}$, hogy $\lim_{k \rightarrow \infty} A^k = D$ akkor és csak akkor, ha a spektrálsugara $\rho(A) \leq 1$. Amennyiben $\rho(A) < 1$, ekkor D nullmátrix, és ha $\rho(A) = 1$, akkor pontosan egy pozitív sajátértéke van, $r = 1$.

A határérték létezésén túl a limit mátrix meghatározását is célul tűzhetjük ki a következő állítás ismeretében:

3. Tétel. [31, 674. oldal] Egy A nemnegatív, irreducibilis, $r = \rho(A)$ spektrálsugarú mátrix primitív, akkor és csak akkor ha létezik véges határértéke $\lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{A}{r}\right)^k = \frac{pq^T}{q^T p} > 0$, ahol p az A mátrix, míg q az A^T mátrix Perron vektora.

Amennyiben az előző állításnál a sztochasztikus tulajdonságot is megköveteljük, akkor a határértékre jóval egyszerűbb összefüggés teljesül:

4. Tétel. [31, 693. oldal] Egy A nemnegatív, irreducibilis, sztochasztikus (soronként normált) és primitív mátrix sajátértéke $r = 1$ és a q^T baloldali Perron vektorát normálva $\sum_{i=1}^n q_i = 1$ állítható, hogy $\lim_{k \rightarrow \infty} A^k = eq^T$, ahol e továbbra is a csupa egyesekből álló vektor. Amennyiben az A mátrix oszloponként normált úgy a határérték $\lim_{k \rightarrow \infty} A^k = pe^T$, vagyis a limit mátrix

$$\begin{pmatrix} p_1 & \dots & p_1 \\ p_2 & \dots & p_2 \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_n & \dots & p_n \end{pmatrix} \text{ alakú.}$$

Végül az A mátrix Cesàro összegéről fogalmazok meg egy állítást:

5. Tétel. (Cesàro) [31, 692. oldal] A nemnegatív, sztochasztikus primitív mátrix és a baloldali Perron vektora q^T , akkor a Cesàro összege $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{I + A + \dots + A^{k-1}}{k} = eq^T$ összefüggéssel határozható meg.

3. Döntéstámogatási és optimalizálási problémákhoz illeszthető matematikai módszerek az energetika területéről

A fölhasznált matematikai eszközök általános bemutatása után speciális problémák és esettanulmányok kerülnek terítékre az előttünk álló fejezetben, ahol az alkalmazott matematikai módszerek egyéni megfogalmazása, a részletgazdag probléma felvetés és az eredmények átfogó értelmezése kerül előtérbe. Munkám első két problémája az energia szektoron belül, a lakossági hőigény biztosítására fókuszál, amely során lokális szinten keresünk választ az egyéni és távfűtési alternatívák optimális arányára. Mivel a hőellátás struktúrája decentralizált rendszerű és csak a nagy energiaigény sűrűségű területeken terjedtek el távfűtési hálózatok, ezért két városra, Szekszárdra és Budapestre végeztem számításokat. A lakossági hő felhasználás esetében ki kell emelni a roppant domináns szezonális hatást, melyben az akár 85%-os havi ingadozás fontos gazdasági tényezőt jelent, ezért modellemben éves adatsorból kellett kiindulnom. Fontos szempont továbbá a fűtési alternatívák összehasonlításánál a környezeti hatás is, ezen belül az élettani hatás. A városokra jellemző nagy népsűrűségű területeken az alacsony kéményekkel rendelkező, elavult, szilárd tüzelőanyagon alapuló egyéni fűtés káros élettani hatása nagyságrendekkel nagyobb a távhőhöz vagy hőszivattyúkhöz kapcsolható értékeknél. Tovább súlyosbítja a következményeket, hogy a károsanyag-kibocsátás a télen történik, mely időszakra gyakran jellemző hidegpárnás szinoptikus helyzet nagyban elősegíti a légszennyezők feldúsulást a légkör alsó rétegeiben. A gazdasági és élettani hatások mellett az üvegházhatású gázok kibocsátásának nagyságrendje kapott szerepet számításaimban. A három szempontra épülő optimalizálási problémát két módszerrel közelítettem meg. Elsőként a három célfüggvényt monetarizált értékekkel kifejezve vontam össze és egy egyszerű disztribúciós probléma LP feladatának kerestem a megoldását, míg a második esetben többcélú optimalizálást alkalmaztam. A harmadik téma a teljes energiaszektort érinti, ahol globális szinten kerestem optimális megoldást az országos hő és villamos energia ellátásra. A modell érdekessége az, hogy az optimális forgatókönyv meghatározásánál, a gazdasági szempontok között szereplő, széles határok között mozgó költségek nem robusztus optimalizálással kerültek kiszámításra, hanem a piac telítettségét figyelembe vevő disztribúciós feladattal, melynek matematikai felírása konvex, nemlineáris célfüggvényt eredményezett. A felvezetett három energetikai probléma mindegyikében szerepet kapnak a többszemponútú döntési modellek, ahol az általános célok megfogalmazása, valamint szempontrendszerrel való leírása közel sem

magától értetődő. Jól definiált szempontrendszerek nélkül pedig pont azok a többszempontú döntéstámogató módszerek alkalmazási lehetőségei lehetetlenülnek el, melyek az átláthatóságot garantálnák. Ennek a fontos résznek a tárgyalása az utolsó két fejezetre marad. Itt az energetikai döntésekhez használható szempontrendszer kialakításának módszertana, illetve a szempontsúlyok meghatározásának bemutatása kerül terítékre. Kutatásomban egy 2017-ben kezdődött társadalmi felmérés adatbázisára támaszkodva olyan szempontrendszer és fontossági súlyok meghatározását tűztem ki célul, melyekkel a magyar társadalomnak, illetve különböző társadalmi csoportjainak energetikai beruházásokkal, vagy stratégiai döntésekkel kapcsolatos véleményalkotási mechanizmusai körültekintően leírhatóak. A kutatás társadalomtudományi részében a felnőtt magyar lakosság volt a célcsoport. A kérdőíves vizsgálatot megelőzően kvalitatív módszerekkel, ún. fókuszcsoportos vizsgálattal részletesen föltárásra került a lakosság különböző csoportjainak véleménye. Ez a vizsgálat lehetőséget adott arra, hogy a legfontosabb tudományos fogalmakkal kapcsolatos általános jelentéstartalmat vagy épp annak hiányát feltérképezzem. A fókuszcsoportos vizsgálat eredményei alapján alakult ki a kérdőíves mintavétel értékelési szempontrendszere és a hozzákapcsolódó fűtési és villamosenergia-termelési alternatívák halmaza. A felmérés kvantitatív részében négy kiemelt szempont (gazdaságos, környezetbarát, biztonságos és kényelmes) fontossága páros összehasonlítással került meghatározásra. Az összes szempont és az alternatívák kölcsönös értékelése azonban direkt módon, öt pontos skálán valósult meg. A nyers adatok statisztikus feldolgozása mellett a matematikai kiértékelést hierarchikus szempont struktúra és általános hálózati modell irányából is megközelítettük. A leegyszerűsített, kompakt szemponthalmaz kialakítás ellenére is komoly kihívást jelentett a társadalomtudományi megközelítés elvárásainak a biztosítása a kérdőívek megszerkesztése során, a matematikai kiértékelhetőség és az energetikai egzaktság garantálása mellett.

3.1. Hátizsák feladat megközelítés

Az energetikai modellezés és scenárió készítés legfontosabb eszközének sokáig a tartamdiagramokra épülő „merit order” technika számított. A módszer lényege abból áll, hogy egy éves, órás felbontású fogyasztási adatsor elemeit növekvő sorba rendezzük, majd a legkisebb fajlagos költséggel rendelkező alternatívával fedjük le az alap energiaigényt és az

egyre költségesebb alternatívák kihasználási óraszámát fokozatosan csökkentjük. A kétezres évek elején jelentek meg azok modellezési eszközök, melyek az alternatíva rangsorok felhasználásával egyszerűbb energetikai scenáriók elkészítését is lehetővé tették a fogyasztási és termelési oldal napi profiljának figyelembevételével. Ezzel a robosztus tartalék kapacitással rendelkező heurisztikus modellek helyét átvették az operációkutatás transzparens módszerei. Ebben a fejezetben olyan módszert ismertetek, amely segítségével egy disztribúciós feladat hátizsák feladattá alakítható át [32]. Ennek jelentősége abban áll, hogy az energetikában általánosan használt „merit order” megoldással analóg megközelítést eredményez. A bemutatásra kerülő modellben Szekszárd városának háztartási fűtés és használati melegvíz előállítására került tárgyalásra, a lakóépületeket három épülettípológiai csoportba soroltam: családi, társas és ipari társasházra. A három épülettípológiai csoport energiaigénye, fűtési alternatívái és az energiaigény területi sűrűsége is lényegesen eltérő. Az épülettípusonként jelenleg alkalmazható korszerű fűtési technológiák környezeti, gazdasági és klímahatás szerinti összehasonlítása mellett fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy a felsorolt szempontok alapján érdemes-e bővíteni a meglévő távfűtési rendszert az ipari társasházakon kívül más épülettípusok bevonásával a távhőhálózatba. A meglévő fűtőművek fosszilis energiahordozói mellé a Paksi atomerőműből származó távhő is az alternatívák közé került. A tranzitvezetéken érkező távhő esetén a beruházási költségek közé kerültek az előszigetelt, vidéki környezetben közvetlenül földbe süllyesztett vezeték pár mellett a szivattyúállomások és az erőművi hőkiadó állomás kialakításának költségei is. Számításaimban a távhőellátást az ipari társasház mellett a többi épülettípológiai csoportra is kiterjesztettem, havi hőigény profiljuk lefedésére összetett hőtermelési portfóliókat alkalmaztam. A portfólió összeállításának alapelve az, hogy az alacsony változó költséggel rendelkező (sok esetben magasabb állandó költséggel megvalósítható) technológiákkal elsősorban a szezonális hatástól független állandó igény kerüljön lefedésre, míg az alap fölötti “csúcsok” magasabb változó költségű technológiákkal is elláthatók. A hőtermelés alternatíváinak összehasonlításakor tehát az állandó és változó költségeket külön kellett értékelnünk. Számításaimban fontos célként szerepelt az üzemelés során felszabaduló üvegházhatású gázok (ÜHG) és egyéb károsanyagok kibocsátásának csökkentése. Az alternatívákra vonatkozó klimatikus, élettani és környezeti hatások mint költségek monetarizálva kerültek összevonásra a gazdasági (állandó és változó költségek) szempontokkal a célfüggvény együtthatókban. A felhasznált adatokat hazai benchmark projektek és nemzetközi adatbázis [33] felhasználásával alakítottam ki (I. melléklet). Az optimális fűtési portfólió meghatározását a három épülettípológiai csoporthoz kidolgozott 25

fűtési alternatívának a felsorolt öt szempont szerinti értékelésével kezdtem meg. A probléma kézenfekvő megközelítését nyújtja a disztribúciós feladatként történő leírás, ahol az $\{a_1; \dots a_{25}\}$ alternatívák, mint $I = \{1, \dots 25\}$ kínálati pont és a három épülettípológiai csoport $\{w_1; \dots w_{12}; w_{13}; \dots w_{24}; w_{25}; \dots w_{36}\}$ szezonális hőigénye, mint $J = \{1, \dots 36\}$ keresleti hely szerepel. Az alternatívákhoz kapcsolódó kínálati pontoknál $\{p_1; \dots p_{25}\}$ beépített teljesítmények is definiálásra kerültek, melyek segítségével az e_{ij} havonta előállítható energia meghatározható. Az e_{ij} értéke az az i -edik alternatívával a j -edik hónapban előállítható maximális energia, mely a legtöbb esetben a beépített teljesítmény és a havi empirikus kihasználási óraszám (havi óraszám közel fele) szorzataként áll elő $e_{ij} = h_{ij} \cdot p_i$. A levegő alapú hőszivattyú és a napkollektor alternatívái esetén a szezonális figyelembevételével kapjuk a h_{ij} együtthatókat. A valós termelési adatokat az x_{ij} valós változó által felvett értékek jelentik. Az x_{ij} havi termelési adat azonban főlrható a havonta rendelkezésre álló p_{ij} „rész teljesítmény” és a havi kihasználási óraszám segítségével $x_{ij} = h_{ij} \cdot p_{ij}$, ahol $p_{ij} \leq p_i$ minden i alternatívára minden j hónapban (1. táblázat).

1. táblázat A disztribúciós feladat keresleti és kínálati pontjai az optimális fűtési portfólió kialakításához

fűtési alternatívák	Családi ház			Társasház			Ipari társasház			
földgáz alapú egyéni fűtés	x_{11}	...	x_{112}	x_{113}	...	x_{124}	x_{125}	...	x_{136}	p_1
:	:		:	:		:	:		:	:
:	:		:	:		:	:		:	:
napkollektoros távhő kisegítés	x_{251}		x_{2512}	x_{2513}		x_{2524}	x_{2525}		x_{2536}	p_{25}
	w_1	...	w_{12}	w_{13}	...	w_{24}	w_{25}	...	w_{36}	

A bevezetett jelölések segítségével a keresleti feltételek,

$$\sum_i x_{ij} = w_j \quad (1)$$

valamint a kínálati feltételek: $x_{ij} \leq e_{ij} = h_{ij} p_i$ alakban írhatók. A p_i beépített teljesítmények bevonása a változók közé a korlátozó feltételeket a következő alakra hozzák, épülettípológiai csoportonként:

$$x_{ij} - h_{ij} \cdot p_i \leq 0 \quad (2)$$

minden i alternatíva, és j hónap esetén. Végül az előjel korlátozó feltételekkel

$$0 \leq x_{ij} \text{ és } 0 \leq p_{ij} \quad (3)$$

kerül lezárásra a megvalósítható tartomány. Az optimalizálási probléma célfüggvénye a következő alakot veszi fel:

$$\sum_{i \in I} \left(d_i \cdot p_i + c_i \sum_{j \in J} h_{ij} \cdot p_{ij} \right) = z(\min) \quad (4)$$

ahol c_i az i -edik alternatíva változó költsége, mely a megtermelt energiával arányos részt adja az összköltségben, míg a d_i a fix költség értékét veszi fel, vagyis a termeléstől független részt. Ezek alapján a fix költséggel rendelkező disztribúciós feladatunknál a p_{ij} , p_i változók optimális értékét keressük az ismert $c_i h_{ij}$, d_i , w_j paraméterek mellett. A (1)-(4) pontban vázolt LP feladatot standard alakban így írhatjuk fel:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i \cdot h_{ij} \cdot p_{ij} + \sum_{i \in I} d_i \cdot p_i = z(\min) \quad (5)$$

$$\sum_i h_{ij} \cdot p_{ij} = w_j \quad (6)$$

$$\text{és } 0 \leq p_i - p_{ij} \text{ minden } i \in I \text{ és } j \in J, \quad (7)$$

$$\text{továbbá } 0 \leq p_{ij} \text{ és } 0 \leq p_i \text{ minden } i \in I \text{ és } j \in J \text{ esetén.} \quad (8)$$

Mivel minden $i \in I$ és $j \in J$ esetén $p_{ij} \leq p_i$ így $\max_j \{p_{ij}\} \leq p_i$, mivel a költség együtthatók nem negatívak $0 \leq d_i$ és $0 \leq p_i$ így a célfüggvény minimumánál (5) teljesül a $\max_j \{p_{ij}\} = p_i$ összefüggés. Ezek alapján az (5) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i \cdot h_{ij} \cdot p_{ij} + \sum_{i \in I} d_i \cdot p_i^* = z(\min) ; \text{ ahol } p_i^* = \max_j \{p_{ij}\}, \quad (9)$$

ahol az LP feladat optimális megoldása a fűtési alternatívák ideális portfólióját eredményezi. A röviden vázolt alapprobléma egy egyszerű disztribúciós feladatra vezet, azonban a probléma átfogalmazásával lehetővé válik, hogy a célfüggvény z értéke olyan diszkrét Δp_{ir} értékekkel legyen kifejezve, melyekre teljesül az $\sum_r \Delta p_{ir} = p_i$ összefüggés. A felírt p_i

teljesítményadagok segítségével a probléma hátzszak feladatként interpretálható. Ez a megközelítés nem csak azért érdekes, mert az energetikai problémáknál általánosan alkalmazott “merit order” módszertanához hasonló, ugyanakkor az LP feladat megoldásának legfontosabb tulajdonságait is szépen kiemeli. Az átfogalmazás során a keresleti pontok

$\sum_i x_{ij} = w_j$ állandóit épülettípológiai csoportonként növekvő sorrendbe rakjuk $j = g(r)$, $r \in \overline{1; 12}$ és a $\Delta w_r = w_{g(r)} - w_{g(r-1)}$; $w_{g(0)} = 0$ növekményekkel hónapok szerint 12 hátzszakot definiálunk. Természetesen egyenlő igények mellett kevesebb zsak kerül definiálásra. A hátzszakok mindegyike a növekvő beépített teljesítményigényt tükrözi $\sum_i h_{ig(r)} \cdot \Delta p_{ir} = \Delta w_r$,

azokat minden esetben a legkedvezőbb költségű teljesítménnyel töltjük fel. Minden r zsakhoz és i alternatívához hozzárendelhetjük a $\left(d_i + c_i \sum_{k=r}^{12} h_{ig(k)} \right) \cdot \Delta p_{ir}$ költséget, melyek közül legyen az $m(r)$ a legkedvezőbb. Mivel a beépített kapacitásnak és a havi hőtermelésnek nem létezik kedvezőbb eredményre vezető felbontása, ezért a

$\left(d_{m(r)} + c_{m(r)} \sum_{k=r}^{12} h_{m(r)g(k)} \right) \cdot \Delta p_{m(r)r} = z'(\min)$

$$\sum_{r=1}^{12} \left(d_{m(r)} + c_{m(r)} \sum_{k=r}^{12} h_{m(r)g(k)} \right) \cdot \Delta p_{m(r)r} = z'(\min) \quad (10)$$

kifejezés az optimális megoldásnak tekinthető.

1. Állítás: Ha p_i beépített teljesítményre és a segítségével előállítható havi $h_{ij} \cdot p_i = w_{ij}$ hőmennyiségre teljesül a következő két feltétel:

$$d_i \cdot p_i + c_i \sum_{j=1}^{12} h_{ij} \cdot p_i \leq d_l \cdot p_l^* + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^* \quad \text{minden } l \in (1..n) \text{ alternatívára és} \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^{12} h_{ij} \cdot p_i = \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^*, \quad (12)$$

vagyis azonos időszak alatt előállított hőmennyiséget az i alternatíva, minden más l alternatívánál kedvezőbben állítja elő, akkor a p_l^* , $l \in (1..n)$ maximális beépített

teljesítményekkel rendelkező alternatívák havi vegyes termelése $\sum_{l=1}^n h_{lj} \cdot p_{lj} = w_{ij}$ nem

eredményezhet kedvezőbb megoldást.

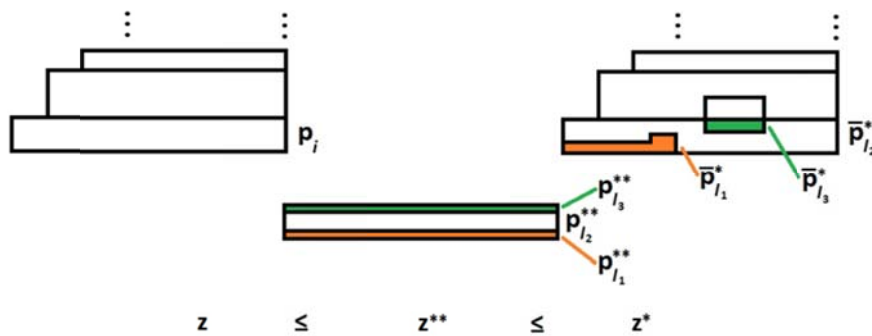
Bizonyítás: Definiáljunk egy Q halmazzal melybe a feladat optimális megoldásából úgy választunk ki alternatívákat, hogy segítségével a havi $h_{ij} \cdot p_i = w_{ij}$ hőmennyiség előállítható legyen (ha szükséges a teljes beépített kapacitásukat a havi igény szerint leszűkítjük \bar{p}_l^* -ra ahol $\bar{p}_{ij}^* \leq p_{ij}^*$). Amennyiben az alternatívák által előállított hőt a következő elven strukturáljuk át:

$$\sum_{l \in Q} \left(d_l \cdot p_l^{**} + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^{**} \right) \leq \sum_{l \in Q} \left(d_l \cdot \bar{p}_l^* + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot \bar{p}_{lj}^* \right) \text{ ahol } p_l^{**} = \frac{\sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot \bar{p}_{lj}^*}{\sum_{j=1}^{12} h_{lj}} \text{ és a feltétel}$$

alapján minden p_l^{**} beépített teljesítményhez létezik p_{il} , hogy

$$d_i \cdot p_{il} + c_i \sum_{j=1}^{12} h_{ij} \cdot p_{il} \leq d_l \cdot p_l^{**} + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^{**} \text{ ahol (11), (12) és } p_i = \sum_{l \in Q} p_{il} \text{ alapján}$$

$$d_i \cdot p_i + c_i \sum_{j=1}^{12} h_{ij} \cdot p_i \leq \sum_{l \in Q} \left(d_l \cdot \bar{p}_l^* + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot \bar{p}_{lj}^* \right).$$



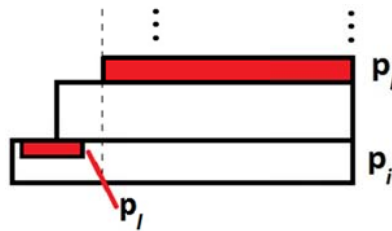
1. ábra A hátizsákok új kapacitásokkal történő feltöltésének összehasonlítása.

Ezek alapján kijelenthető, hogy az energiaigény-növekmények előállítása új beépített kapacitások szakaszos üzeménél kedvezőbben valósítható meg homogén üzemeltetéssel (1. ábra). ■

2. Állítás: Meglévő beépített teljesítményű p_l alternatíva havi termelését nem célszerű átadni egy meglévő beépített teljesítményű p_l alternatívának amennyiben

$$d_l \cdot p_l^* + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^* \leq d_l \cdot p_l^* + c_l \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^* \quad (13)$$

minden $l \in (1, \dots, n)$ esetén, illetve ahol $\sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^* = \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_l^* = w_l$ (2. ábra).



2. ábra A háztársák részleges feltöltése

Bizonyítás: A beépítésre kerülő alternatívák minden $l \in H$ eleméhez létezik $w_l = \sum_{j=1}^{12} h_{lj} \cdot p_{lj}$,

$w_l < w_l$ előállított energia, melyre

$$d_l \cdot p_l^* + c_l w_l \leq d_l \cdot p_l^{**} + c_l w_l \text{ és } p_l^{**} \leq p_l^* \quad (14)$$

A (13)-(14) feltételek alapján kapott egyenlőtlenségben $c_l < d_l \cdot \frac{p_l^{**} - p_l^*}{w_l - w_l} + c_l$ a $\frac{p_l^{**} - p_l^*}{w_l - w_l}$

hányados nem lehet pozitív vagyis $c_l < c_l$. Ezek alapján a (13) feltételnek eleget tevő p_l^* beépített kapacitással rendelkező alternatíva termelését nem érdemes más már meglévő kapacitás termelésével kiváltani, hiszen ezzel a célfüggvény értéke növekedne. ■

A két állítás segítségével bizonyításra került, hogy az optimális megoldás esetén a korábban definiált Δw_l háztársák megtöltését homogén módon kell megvalósítani. A felvetett probléma LP és háztársák feladatként történő megfogalmazására vonatkozó számítást is elvégeztem, havi felbontású adatsoron GAMS, illetve Excel alapú környezetben. A számítások során a célfüggvény értékben csak a kerekítési hibára visszavezethető eltérés mutatkozott.

3.2. Többcélú optimalizálás

Létünk alapeleme, hogy döntéseinket különböző szempontok szerint igyekszünk mérlegelni. A döntési szempontok összevetése azonban sok esetben komoly nehézséget okoz, elsősorban olyan esetekben, amikor az egymással szembenálló szempontok között egy kompromisszumos megoldásra törekszünk. Az ilyen „trade off” szituációk feloldására léteznek a korábbi fejezetekben ismertetett eljárások, azonban az eredmények stabilitásának megismeréséhez elengedhetetlen egyfajta érzékenységvizsgálat megvalósítása. A előző mintapélda továbbgondolásaként most Budapest háztartási fűtés és használati melegvíz előállítását került célkeresztbe, azonban nem disztribúciós probléma átfogalmazásaként, hanem mint többcélú optimalizálási feladat súlyozásos eljárással történő megoldása. Számításaim során, hasonlóan ez eddigiekhez, három szempont (gazdasági, környezeti és klímahatás) figyelembevételével kerestem az optimális hőtermelési portfóliót az egymástól eltérő háztartási hőigények biztosítására. A gazdasági szempontnál az állandó és változó költség szétválasztását a jelentősen változó havi hőigény indokolta, míg a környezeti és klímahatás mellett az élettani szempont figyelembevételét az egyes alternatívák intenzív károsanyag kibocsátása tette szükségessé. A gazdasági szempont esetén éves költségekből indultunk ki, ahol az összehangolt hazai és nemzetközi adatbázisok alapján a megtermelt energiára fajlagosított változó költség, illetve a beruházási költség egy évre vetített (4 százalékos diszkontálási állandó és teljes üzemidő figyelembevételével) értéke szerepel a célfüggvényben. A klímahatás értékelésénél az üzemeléshez kapcsolódó ÜHG kibocsátás a jelenlegi roppant alacsony széndioxid kvóta árral (5 €/t) került monetarizálásra. A környezeti szempont értékelésénél az emberi egészségre, a természeti és épített környezetre gyakorolt káros hatásokat vettük figyelembe. A hőtermelési alternatívák regionális környezeti hatásának monetarizálásánál a CASES [34] project módszertanára és eredményeire építettünk. Az optimális hőtermelési portfólió meghatározását ismét disztribúciós feladatként valósítottam meg a három szempont figyelembevételével, különböző fontossági súlyokat alkalmazva [35]. A kialakított modellben a szemétegetőmű által a három épülettípológiai csoportnak szolgáltatott hővel az $\{a_1; \dots a_{28}\}$ alternatívák számát 28-ra bővítettem, megtartva az atomerőmű által szolgáltatott távhőt, mint $I = \{1, \dots 28\}$ kínálati pontot. A három épülettípológiai csoport szezonális hőigénye, hasonlóan a korábbiakhoz $\{w_1; \dots w_{12}; w_{13}; \dots w_{24}; w_{25}; \dots w_{36}\}$, mint $J = \{1, \dots 36\}$ keresleti helyek szerepelnek, illetve az alternatívákhoz kapcsolódó kínálati pontok beépített teljesítménye $\{p_1; \dots p_{28}\}$. Az i -edik

alternatívával a j -edik hónapban előállítható e_{ij} maximális energia a beépített teljesítmény és a havi empirikus kihasználási óraszám szorzataként áll elő $e_{ij} = h_{ij} \cdot p_i$. Az alternatívák havi hőtermelési értékeit az x_{ij} valós változók adják, melyek helyett a havi p_{ij} fölhasznált teljesítményértékeket használjuk az egyenletekben. Az alternatívák havi hőtermelési értékei, a szezonalitást figyelembe vevő maximális h_{ij} havi kihasználási óraszám, mint konstans értékek és a fölhasznált teljesítmény értékek szorzataként fejezhetők ki, $x_{ij} = h_{ij} \cdot p_{ij}$, ahol $p_{ij} \leq p_i$ minden i alternatívára minden j hónapban. A fix költséggel rendelkező szállítási feladat folytonos relaxáltjának standard alakja megegyezik a (5)-(8) egyenletekkel:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_i \cdot h_{ij} \cdot p_{ij} + \sum_{i \in I} d_i \cdot p_i = z(\min)$$

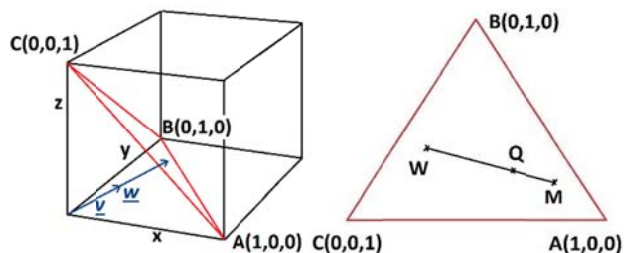
$$\sum_i h_{ij} \cdot p_{ij} = w_j \text{ és } 0 \leq p_i - p_{ij} \text{ minden } i \in I \text{ és } j \in J \text{ esetén, továbbá}$$

$$0 \leq p_{ij} \text{ és } 0 \leq p_i \text{ minden } i \in I \text{ és } j \in J \text{ esetén,}$$

ahol az optimális megoldás a fűtési alternatívák ideális portfólióját eredményezi. A célfüggvényben szereplő d_i együtthatók a fix költség értékét veszik fel, vagyis a termeléstől független részt. A c_i együtthatók az i -ik alternatíva változó költségét számszerűsítik, mely a megtermelt energiával arányos részt adja az összköltségben, beleértve a termeléshez kapcsolódó klíma és környezeti hatások monetarizált értékét. Fontos tudni azonban, hogy a klíma és környezeti szempontok indikátorainak monetarizálását roppant nagy bizonytalanság övezi. Elég arra gondolnunk, hogy a széndioxid kvóta ár 2005 évi bevezetése óta értéke 2 €/t és 120€/t között mozgott. Hasonlóan, az emberi egészségre gyakorolt hatásnál az okozott betegségekkel összefüggésben elvesztett életéveket kell pénzben kifejezni, mely a nagyfokú bizonytalansága mellett súlyos etikai kérdéseket vet fel. Munkámban a három szempont egységes skálázását többcélú optimalizálással kerültem ki, melynek eredményei érzékenységvizsgálatként is bemutatathatók. A többcélú optimalizálást súlyozásos eljárással valósítottam meg, melynek során az alternatívákhoz kapcsolódó „költségeket” szempontonként egy (0,1) intervallumból kiválasztott súllyal szoroztam meg, és az így kialakított egységssimplex minden $q(q_x, q_y, q_z)$ pontja a három szempont egy súlyozását adja meg (3. ábra). Minden q ponthoz egy önálló LP feladat társul, melynek optimális megoldásában a k -ik alternatívához tartozó változó értéke legyen a_{kq} , valamint a célfüggvényben hozzátartozó együttható három szempont szerint felírható komponense

(c_{kx}, c_{ky}, c_{kz}) . Az alternatívákhoz tartozó állandó költségeket d_k együtthatókkal és p_k beépített teljesítményekkel vettem figyelembe. Az állandó költségeket csak a gazdasági szempont q_z szempont súlyával tarszformálva jutottam a q ponthoz tartozó optimális célfüggvény végső alakjához:

$$z_q = \sum_{k \in I} (q_x c_{kx} a_{kq} + q_y c_{ky} a_{kq} + q_z c_{kz} a_{kq} + q_z d_k p_k).$$



3. ábra A három szempontoz tartozó súlyok által kifeszített egységsszimplex

A megoldások áttekinthető ábrázolásához fontos tudni, hogy a kocka pontjai közül elég az ABC síkmetszet, mint egységsszimplex pontjainak a súlykoordinátáihoz tartozó megoldásokat vizsgálnunk, hiszen ha $\underline{w} = \alpha \underline{v}$ akkor $s_w = \alpha s_v$ továbbá $a_{kv} = a_{kw}$ minden $k \in I$. Az érzékenységvizsgálat elvégzéséhez az egységsszimplexen pontról-pontra elemeznünk kell a megoldásokat, tanulmányozva az alternatíva változók alakulását. A megoldások vizsgálatánál fontos az a felismerés, hogy amennyiben egy szakasz végpontjaiban a célfüggvény értéke megegyezik, akkor segítségével minden köztes pontra alsó korlátot definiálhatunk. Az egységsszimplex három csúcsában a célfüggvény a (c_{kx}, c_{ky}, c_{kz}) együtthatók újradefiniálásával elérhető az azonos célfüggvényérték, mely segítségével a teljes terület alsó korlátja meghatározható.

3. Állítás: $z_w = z_m$ és $\underline{q} = \mu \underline{w} + (1 - \mu) \underline{m}$, $\mu \in [0; 1]$ akkor $z_w \leq z_q$.

Bizonyítás: $z_q = \sum_{k \in I} (q_x c_{kx} a_{kq} + q_y c_{ky} a_{kq} + q_z c_{kz} a_{kq} + q_z d_k p_k)$ alak átírható

$z_q = \mu \cdot \sum_{k \in I} (w_x c_{kx} a_{kq} + w_y c_{ky} a_{kq} + w_z c_{kz} a_{kq} + w_z d_k p_k) + (1 - \mu) \sum_{k \in I} (m_x c_{kx} a_{kq} + m_y c_{ky} a_{kq} + m_z c_{kz} a_{kq} + m_z d_k p_k)$ formára, vagyis $z_q = \mu z'_w + (1 - \mu) z'_m$ ahol z'_w és z'_m a w és m pontokhoz tartozó, nem feltétlen optimális célfüggvény értékek. Mivel $s_w \leq s'_w$ és $s_m \leq s'_m$ így teljesül az eredeti állítás:

$$z_w = \mu z_w + (1 - \mu) z_m \leq z_q \cdot \blacksquare$$

Az alsó korlát ismerete nem mellékes, azonban önmagában nagyon kevés támpontot nyújt az érzékenységvizsgálat elvégzéséhez, sokkal fontosabb megismernünk az alternatíva változók alakulását. Mivel az alap LP feladat korlátozó feltételei (6)-(8) megegyeznek, így várakozásunk szerint az egységszimplex $q(q_x, q_y, q_z)$ pontjainak jól meghatározott halmazánál lesznek ugrások az alternatíva változók értékében. Ez abból adódik, hogy a megvalósítható tartomány optimális extrémális pontjánál a célfüggvény együtthatók csekély megváltozásával a szimplex módszer csupán a töréspontoknál eredményez új megoldást. Az érzékenységvizsgálat elsődleges célja az ugrásokhoz kapcsolódó törésvonalak felkutatása az egységszimplex területén. A korábbi szakasz hátizsák pakolási (1)-(2) állításainak felhasználásával kijelenthető, hogy akkor lesz törésvonal az alternatíva változók értékében, ha a legjobb fajlagosított „összköltség” $[q_z c_{iz} d_i + (q_x c_{ix} + q_y c_{iy} + q_z c_{iz}) \sum_{j=r}^{12} h_{ij}] \Delta p_{ir}$ helyét még kedvezőbb veszi át az (x_p, y_p, z_p) értékek változtatásával, bármelyik $r \in \overline{1; 12}$ hátizsák esetén. Az érzékenységvizsgálat gyakorlati kivitelezése tehát tetszőleges q ponthoz tartozó optimális megoldásból kiindulva megvalósítható. Az első lépésben az optimális forgatókönyv alternatíváit sorba rendezzük a $\sum_{j=1}^{12} h_{ij}$ kihasználási óraszámuk szerint. A legjobb kihasználású alternatívától indulva megvizsgáljuk, hogy az egységszimplex három csúcspontjában létezik-e kedvezőbb költséggel rendelkező új alternatíva. Amennyiben találunk ilyet, akkor a két fajlagosított „összköltség” síkjának metszésvonala mentén az új alternatíva kiváltja az addigi optimálisat. Így a hátizsák megközelítés felhasználásával a törésvonalak letapogathatóvá válnak. Munkámban az egységszimplex kerületén haladva ábrázolom a forgatókönyvek alakulását különböző súlyfaktorok esetén.

3.3. Nemlineáris optimalizálás

A megújuló részarány fejlesztési lehetőségei és korlátai, illetve ideális összetétele központi téma maradt az energetikában a 2009/28 EK irányelv bevezetése óta. Magyarországon a megújuló energiaforrásokból előállított energia jelenlegi részaránya 14.65%, ugyanakkor a villamos energia, közlekedés és fűtés-hűtés ágazatokban a kötelezettségek további intenzív növekedése várható a következő évtizedben. A jelenlegi

megújuló részarányra vonatkozó célszámok a teljes Európai Unióra fogalmazódtak meg, mely alapján 2030-ig 32 százalékra kell növelni a megújuló részarányt a végső energia felhasználásban, 5 százalékkal meghaladva a 2020-as célszámot [33]. A három szektorból míg a villamos energia, fűtés és hűtés szektorok a kapcsolt energia fejlesztés révén szorosan összefonódnak és értékelésük egységes megközelítést igényel, addig a közlekedési ágazat értékelése külön is elvégezhető, hiszen elhanyagolható mértékben támaszkodnak azonos energiahordozókra. Munkám harmadik szakaszában az ideális megújuló alapú hő és villamosenergia-termelési portfólió kidolgozását tűztem ki célul, felhasználva a szakirodalomban elérhető hazai fajlagos energiaköltségeket, megyei szintű energia potenciál és hőigény adatokat. Külön ki kell emelnünk ezek közül a fajlagos energiaköltségeket, ahol a beruházási helyszín adottságaival összefüggésben az adatok széles intervallumban mozoghatnak. A költségek bizonytalanságát úgy vettem figyelembe a bemutatásra kerülő modellben, hogy a piac telítődésével párhuzamosan a fajlagos költségeket növeltem, így szimulálva azt az egyszerű megfigyelést, hogy először a legjobb adottságú helyeken történnek beruházások. A kialakított optimalizálási modell azonban nemlineáris programozási feladatot eredményez. Az alapprobléma megfogalmazásánál a jelenlegi erőmű állományt nem vettem figyelembe, hanem egy idealizált, célként kitűzhető energiamix meghatározásán dolgoztam. A célnak kitűzött ideális forgatókönyvhöz vezető számítások során elsősorban gazdasági megközelítést alkalmaztam, figyelembe véve az adott energiatermelési alternatíva fajlagos költségét, azaz az *LCOE*-t (average lifetime Levelised Cost Of Electricity generation), melynek értékében az élettartam alatti költségek diszkontált értéke és a megtermelt energia diszkontált értékének hányadosa szerepel:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

ahol I_t a beruházási költség, M_t a karbantartási és üzemeltetési költség, F_t az üzemanyag költség és E_t a megtermelt energia a t -ik évben, valamint n az élettartam és r a diszkonttényező.

A fajlagos költségek meghatározásánál kiemelt szerepet játszik az élettartam és a diszkonttényező. Az első esetén az általánosan elfogadott mérnöki adatokból indultam ki, míg a második esetében $r = 4\%$ értéket használtam fel. Kiegészítő számításként a széndioxid kvóta árral, illetve a környezeti és élettani hatások externális költségével is elvégeztem az

optimalizálást. A beruházási és üzemeltetési költségeket benchmark projektek tanulmányozásával határoztam meg (I. melléklet). Több éves adathalmaz tapasztalata alapján megállapítható, hogy a költségek széles $[c_{min}; c_{max}]$ intervallumban mozognak, melyeket erősen befolyásol a telepített üzem fizikai adottsága és az ezzel szorosan összefüggő kihasználási óraszám. A vázolt feladat matematikai felírásában lineáris függvényekkel vettem figyelembe a piac „telítettségét”, vagyis először minden technológiai alternatíva a legkedvezőbb feltételek mellett kerül telepítésre, majd a beépített potenciál függvényében fokozatosan veszít versenyképességéből. Az optimalizálási probléma matematikai leírását egy disztribúciós feladat konvex nemlineáris célfüggvényű eseteként fogalmaztam meg [36]. A probléma pontos meghatározásához négy halmazra van szükségünk. Egyik a megújuló energiahordozók E halmaza, ahol $|E|=m$. A másodikba a fűtés-hűtés és villamos energia szektorban alkalmazásban lévő technológiákat az A halmaz méretlépcsőnként tartalmazza, $|A|=k$. A felhasználási terület alapján három méretlépcsőt különböztetek meg, az egyéni felhasználásra szánt háztartási, az lokális ellátást biztosító falu szintű és a globálisan termelő ipari egységeket, melyek között a célfüggvény együtthatókban van csupán eltérés. A fűtés és a használati melegvíz igény meghatározásához, az eddigiekhez hasonlóan T épülettípológiai csoportok kerültek kiválasztásra, ahol $|T|=t$. Szükség volt továbbá az L lokális területegységek halmazának a bevezetésére, ahol $|L|=s$, hiszen a hőigényt és a rendelkezésre álló megújuló energiapotenciált is területi felbontásban vettem figyelembe számításaim során. A felsorolt kiindulási halmazok segítségével a következő függvények és relációk értelmezhetők:

$g: A \rightarrow E$ alternatívákhoz tartozó energiahordozók függvény. Minden egyes energiafejlesztési technológiához csupán egy energiahordozót rendelünk. Számításaink során a g függvény inverz relációja is szerepet kap, ahol $\{g^{-1}(e_i)\}$ az i -ik energiahordozóhoz tartozó alternatívák halmaza.

$f: A \rightarrow T$ alternatívákhoz tartozó épülettípológia függvény. Az energiafejlesztési technológiák méretlépcsői úgy lettek definiálva, hogy egy épülettípológiai csoportot szolgáljanak ki. Az f függvény $\{f^{-1}(t_i)\}$ inverz relációja megadja az i -ik épülettípológiai csoporthoz tartozó alternatívák halmazát.

A számszerű kiértékeléshez kapcsolódó adatokat két területi alapon definiált paraméter mátrixszal kerül megadásra. A $P \in \mathbb{R}^{s \times m}$ mátrix értékei a lokális potenciál értékeket számszerűsítik, vagyis az adott területegységen rendelkezésre álló megújuló energiaforrások potenciálját úgy, hogy a sorok a lokális területegységeket, míg az oszlopok az

energiahordozókat járják végig. A $H \in \mathbb{R}^{s \times t}$ valós értékű mátrix az épülettípológiai csoportok lokális fűtés és használati melegvízre vonatkozó hőigényét számszerűsíti a meglévő épületállomány alapján. Fontos kiemelni azonban, hogy villamosenergia-igényt globálisan kezeljük, tehát nincs területi felbontása, hiszen a hővel ellentétben szállítása kiépített infrastruktúrával rendelkezik. A paraméterekhez hasonlóan a változókat is táblázatos formában kezeltem, az optimalizálás során a technológiai alternatívákhoz lokális skálán rendelt megtermelt energia mennyiségek értékeit a $V \in \mathbb{R}^{s \times k}$ mátrix elemei szimbolizálták.

Bármely lehetséges megoldáshoz tartozó v_{li} energia értékek esetén $\forall i \in \overline{1:k} \quad \sum_{l=1}^s v_{li}$, azaz az i -edik oszlop összege megadja az i -edik technológia által az l lokális területegységekben termelt globális energia értékét. A w_i globális energia értékeket energiahordozónként

összegezve $\sum_{i \in \{g^{-1}(l)\}} \sum_{l=1}^s v_{li} = w_i$ kapjuk az évente megtermelt energia mennyiségét. A

célfüggvényben a piactelítődés figyelembevételéhez az m darab w_i értéket változóként kezeltem, így az árnövekedés kompakt formában felírható, ugyanakkor ezzel növekszik a feltételek száma is. Hasonlóan járhatunk el a kapcsolt hő és villamos-energiatermelésnél, ahol a j -edik és a i -edik alternatíva együtt termelése esetén, a velük alkotott rendezett pár eleme a kogenerációra alkalmas technológiák $(j; i) \in C$ halmazának. A C halmaz alternatívapárjainál $(j; i) \in C$ három változót vezettem be minden egyes l régióban, a megtermelt hő v_{lj} és villamos energia v_{li} mennyiségét, illetve q_{lji} -t, amely az ideális termelési aránytól $h = \frac{v_{lj}}{v_{li}} = 0,3$ való eltérés, azaz $q_{lji} = v_{li}h - v_{lj}$. Erre azért van szükség, mert a kapcsolt hő és villamosenergia-termelésnél biztosítani kell a tisztán villamosenergia-termelés lehetőségét is, azonban ez csak romló hatásfokkal, tehát magasabb költséggel valósítható meg. Az ideálisnak tekintett h értéktől elmozdulva, a célfüggvényben így d_{ji} egységáron $d_{ji}q_{lji}^2$ többlet költség jelentkezik. A disztribúciós feladathoz kapcsolódó kínálati feltételek a lokális potenciálokkal fogalmazhatók meg:

$$\forall l \in [1:s] \text{ régió és } \forall j \in [1:m] \text{ energiahordozó esetén } \sum_{a \in \{g^{-1}(j)\}} v_{la} \leq p_{lj},$$

míg a villamos energia és hőigényre vonatkozó termelési feltételek, épülettípológiai csoportonként kerülnek felírásra:

$$\forall l \in [1:s] \text{ régió és } \forall j \in [1:t] \text{ épülettípológiai csoport esetén } \sum_{a \in \{f^{-1}(j)\}} v_{la} \leq h_{lj}.$$

A megújuló energiatermelésre vonatkozó kötelezettséget azonban teljesíteni kell az előjel korlátozó feltételekkel együtt, azaz

$$\sum_{i=1}^m w_i = Q, \text{ valamint}$$

$0 \leq v_{li}, 0 \leq w_i$ és $0 \leq q_{lij}$ minden $l \in L, i \in A$ és $j \in A$ esetén.

A célfüggvényben az adott $a \in A$ alternatívához tartozó c_a költség együtthatókat a lineárisan növekvő árak átlagos értéke adja:

$$\bar{c}_a = \frac{1}{v_j} \int_0^{v_j} \left(c_{a \min} + \frac{c_{a \max} - c_{a \min}}{p_j} y \right) dy = c_{a \min} + \frac{c_{a \max} - c_{a \min}}{2p_j} v_j$$

$$\text{ahol } p_j = \sum_{l=1}^s p_{lj} \quad \text{és} \quad v_j = \sum_{l=1}^s \sum_{a \in \{g^{-1}(j)\}} v_{la}$$

a célfüggvény értéke pedig

$$\sum_{l=1}^s \left(\sum_{a=1}^k \bar{c}_a \cdot v_{la} + \sum_{(j:i) \in C} d_{ji} \cdot q_{lji}^2 \right) = z(\min)$$

képlettel számolható ki. A kvadratikus kifejezés nemnegatív költség együtthatói garantálják a probléma konvexitását, mely az általános metodikai részben említett Wolfe-módszerrel megoldható. A vázolt NLP feladat optimális megoldása a fűtési és villamosenergia-termelési alternatívák ideális, hazai portfólióját eredményezi.

3.4. Értékelési szempontrendszer kialakítása

A hő és villamosenergia-felhasználás minden társadalmi réteget érint. Nagyobb energetikai beruházások vagy egy-egy új technológia megjelenése gyakran válik olyan társadalmi témává, mellyel kapcsolatos véleményét a felnőtt lakosság igyekszik definiálni. Mivel a különböző társadalmi rétegekhez eltérő médiumok közvetítenek üzeneteket, így a lakosságban kialakult nyelvezet és fogalomrendszer szélsőségesen eltérhet. Az energetikához kapcsolódó fogalomrendszer fontos elemei az energetikai alternatívák és forgatókönyvek megítélésére alkalmas egyszerű és összetett szempontok. A munkámban felhasznált

szempontok halmaza korábbi tanulmányok [2][37] és az MTA Energiatudományi Kutatóközpont 2019/140 számú „A lakosság energiaellátási preferenciáinak vizsgálata” című projektjének a keretében megvalósított fókuszcsoportos beszélgetések eredményei alapján lettek összeállítva. Kutatásom elsődleges célja az összetett értékelési szempontok egyszerű szempontokkal való leírása, és ennek segítségével egy hierarchikus szempontrendszer kialakítása volt. További célként az egész hierarchikus szempontrendszer fontossági súlyokkal való ellátását tűztük ki, mely alapja lehet az energetika területén alkalmazott többszemponútú döntési modellnek. A nemzetközi szakirodalomban gyakran kerül alkalmazásra többszemponútú döntési modellek hierarchikus megközelítése (MCDA-AHP) energetikai forgatókönyvek vagy alternatívák összehasonlítása során, mely értékelési módszerek alternatív megoldást nyújtottak a korábban egyeduralkodó, monetarizált költségekre támaszkodó eljárások mellett [38]. A hierarchikus szempontrendszer kialakítása azonban sok esetben csak a matematikai kiértékelés egyszerűsítésére szolgál, sok esetben a főszempontok függetlensége nem garantált. A szempontrendszer kapcsolatrendszerének meghatározására számtalan módszer létezik a szakirodalomban, melyek elsősorban szempont csoportok értékelésen alapszanak [39], azonban munkámban az energetikai alternatívák párhuzamos értékelése új megközelítést tett szükségessé, amely a szempontsúlyok meghatározásánál az MCDA-ANP modell alkalmazásához vezetett. Munkámban, az említett projekt országos felméréseivel kialakult szempontrendszerének hierarchikus vizsgálata során kettős célt fogalmaztam meg, melyek egymással szorosan összefüggtek. A főszempontok esetén az alszempont-rendszer feltérképezése és hierarchikus felírása volt a cél az esetleges átfedések felismerésével. A többi összetett szempontnál, mint például a fenntartható vagy megbízható csupán arra a kérdésre kerestünk választ, hogy azok milyen módon definiálhatók különböző alszempontok segítségével [40]. Az összetett szempontok és benne a főszempontok értelmezése, természetesen egyéneként különböző lehet, mely adat önmagában is érdekes, azonban egyéb szoció-demográfiai adattal való összevetésük akár egyszerűbb validálást is lehetővé tesz. Mindezek mellett munkám távlati céljaként az egész hierarchikus szempontrendszer fontossági súlyainak meghatározását fogalmaztam meg. Ennek érdekében értékelési modellünkben olyan gondosan kiválasztott n elemű alternatívahalmazt alkalmaztunk $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, melynek elemei minden szempont alapján jól értékelhetők (2. táblázat). Az egyes alternatívák minden egyes $\{1, \dots, k\}$ összetett szempont és $\{k+1, \dots, r\}$ alszempont szerinti értékelését egy értékelési vektor komponenseiként definiáltuk. Az így kapott $s_1(q_{11}, \dots, q_{1n}), \dots, s_k(q_{k1}, \dots, q_{kn})$ főszempontokhoz tartozó értékelési

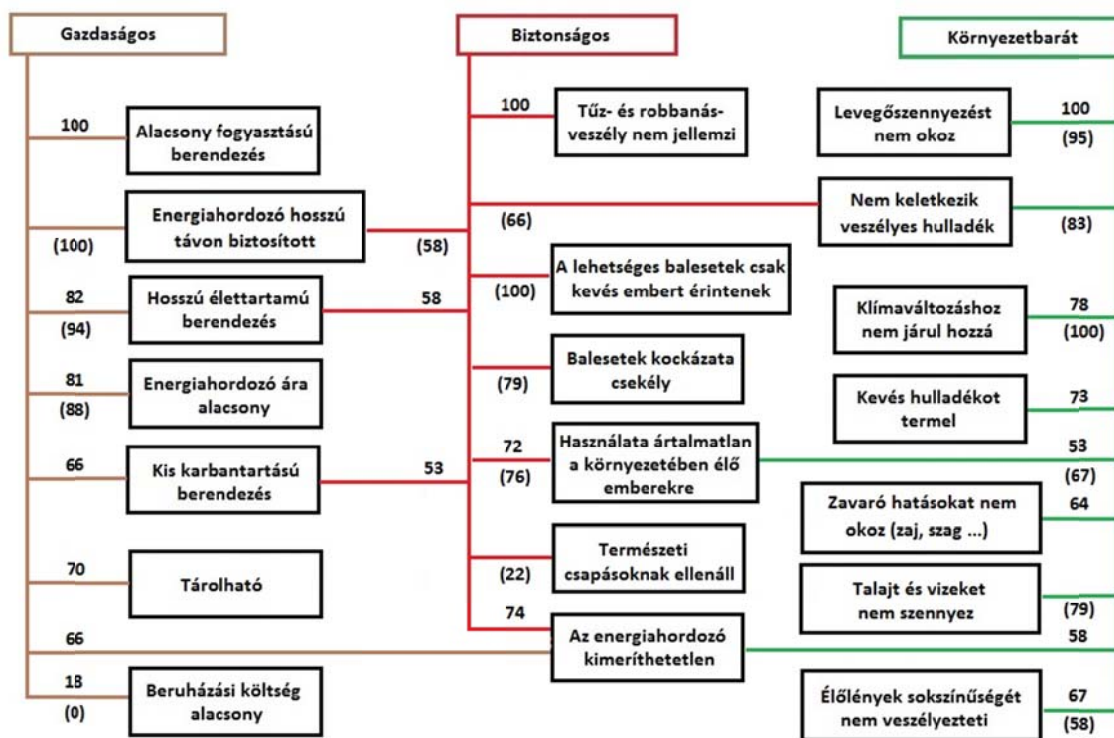
vektorokat, az $s_{k+1}(q_{(k+1)1}, \dots, q_{(k+1)n}), \dots, s_r(q_{r1}, \dots, q_{rn})$ alszemponatok értékelési vektorainak optimális lineáris kombinációjával állítottam elő, tehát minden $i \in \overline{1, k}$ esetén $s_i = \sum_{l=k+1}^r \lambda_{il} q_{lj}$.

2. táblázat Az alternatívák szempontok szerinti értékelése

Szempontok, fogalmak		Alternatívák [$a_1 \dots a_n$]				
		Napenergia	Szélenergia	...	...
Összetett szempontok [1...k]	Gazdaságos	q_{11}	q_{12}	...	...	q_{1n}
	Biztonságos	...				...
	Fenntartható	...				...
	Megújuló	...				...
	:
	:	q_{k1}	...		...	q_{kn}
Alszemponatok [k+1...r]	Hosszú élettartam	$q_{(k+1)1}$	...		...	$q_{(k+1)n}$
	Üzemanyag ár	...				...
	Élettani hatás	...				...
	Levegőszennyezés	...				...
	:
	:	q_{r1}	...		...	q_{rn}

Az optimális lineáris kombinációt legkisebb négyzetek módszerével számoltam ki, vagyis a $\sqrt{\sum_{j=1}^n (q_{ij} - \sum_{l=k+1}^r \lambda_{il} q_{lj})^2} = \min$. célfüggvény minimalizálásával. A négyzetgyök elhagyásával kialakult kvadratikus probléma konvex, így a korábban tárgyalt módszerekkel megoldható. Ezek alapján minden egyes i összetett szempont esetén meghatározható egy λ_{ik} együttható, mely az i -edik összetett szempont és a k -edik alszemponat hasonlóságát adja meg. Ez a hasonlósági együttható volt az elsődleges támpont egy-egy összetett szempont alszemponat-rendszerének feltérképezésénél. Az alszemponat halmazok kialakításánál azonban minden esetben egy előre definiált, triviálisan meghatározható kiindulási halmazt is rögzíteni kellett (pl: a gazdaságos főszempont esetén az összes költséggel kapcsolatos szempontot). Minden i összetett szempont kiindulási halmazához tartozó alszemponatok indexét egy H_i

halmazba helyeztük, míg \bar{H}_i komplementer halmaza azokat az alszempont indexeket tartalmazta, melyek nem állnak direkt kapcsolatban az i szemponttal. Az i összetett szempont-hoz tartozó kiindulási halmazt azokkal az alszempont indexekkel bővítettem, melyeknél a válaszadók kiértékelt szempont súlyainak mértani közepe egy K_i küszöbszámot meghaladtak. A K_i küszöbszám meghatározásánál nem dolgozhattam minden összetett szempont-ra érvényes előre rögzített értékkel, hiszen a lineáris kombináció együtthatói és így a szempont súlyok is függenek az összetett szempont definiáló halmazának számosságától. Ennek megfelelően a K_i küszöbszám $K_i = \max_{k \in \bar{H}_i} \{\lambda_{ik}\}$ értéket vette fel, amit úgy kell érteni, hogy a kiindulási halmaz csak az első, főszempont-hoz biztosan nem kapcsolható alszempont-ig került bővítésre.



4. ábra Három összetett szempont alszempontrendszer a hasonlósági együtthatók normált értékével (zárójelben a villamosenergia-termelés értékével), melyek meghatározására a 4.4 fejezetben térek ki

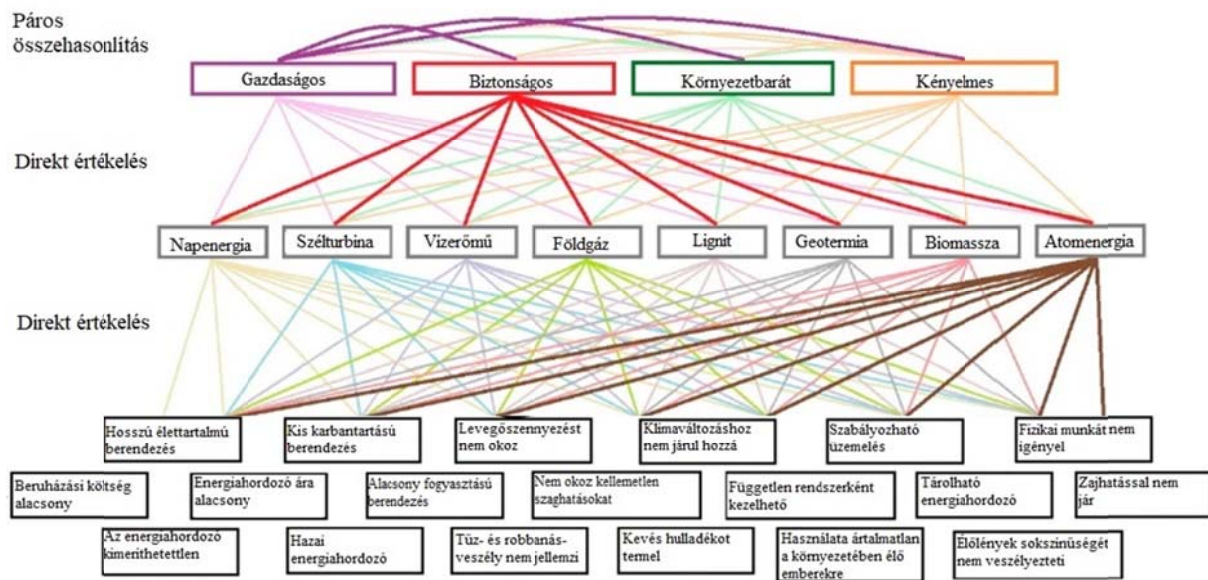
Az így definiált küszöbszám esetén a kialakult hierarchikus szempontrendszer alszempont-halmazai nem diszjunktak, azonban jól értelmezhető összefüggéseket eredményeznek a főszempontok között (4. ábra). A halmazok közötti átfedés fontos következménye az, hogy az általános szempontsúlyok meghatározására a hierarchikus megközelítés (MCDA-AHP) nem

alkalmas. Az eljárás természetes velejárója volt, hogy néhány kevésbé domináló alszempontra kirostálódott az értékelési szempontrendszerből, mint például a „munkahelyteremtés” vagy az „ingatlan értékét növeli”. A vázolt módszerrel az összetett szempontok fogalmi (alszempontra szerinti) összetétele egyenként és aggregált értékkel is kiszámolásra kerültek, azonban hierarchikus modellt alkalmazva, a nem teljesen független főszempontok súlyokból kiindulva az alternatívák vagy az alszempontra rangsora nem egyértelműen meghatározható.

3.5. Értékelési szempontsúlyok meghatározása

Az összetett döntési feladatok a szerteágazó szempontok együttes mérlegelését igénylik, ahol a szempontok definiálása, strukturálása és integrálása alapvető része az alkalmazott módszertannak. Ötödik kutatási célom az volt, hogy az energetikában általánosan használható értékelési szempontrendszert, és ezekhez kapcsolódó fontossági súlyokat határozzak meg, mellyel a magyar társadalomnak, illetve egyes csoportjainak véleményalkotási mechanizmusai a leginkább leírhatóak. A szempontrendszer kialakításához elhagytam a fenntarthatóság három pilléréhez [41] kapcsolódó hierarchikus megközelítést és a társadalomtudományi módszerekkel kialakított szemponthalmaz belső struktúráját. A fontossági súlyok meghatározása egy sokoldalúan felhasználható eszköz, az analytic network process (ANP) módszerével történt. Az ANP módszert az alapfeladat átfogalmazásával alkalmassá tettem az alszempontra és az alternatívák egységes értékelésére. Munkám kiindulópontját a főszempontok rangsorolására alkalmas páros összehasonlítású adatsor nyújtotta. A kialakított modell tömören úgy összegezzhető, hogy a főszempontok ismert rangsorát egyetlen közvetítő halmazrendszer vetíti az alszempontra irányába. Ezen halmazrendszer diszjunkt halmazokból áll, melynek elemei kölcsönösen értékelhetők mind a fő-, mind az alszempontra segítségével. Tanulmányomban a közvetítő halmaz az értékelésre kerülő alternatívák csoportja lett, rajtuk keresztül kerülnek rangsorolásra az alszempontra is. Az alternatívák értékelésének kiemelt szerepét a fókuszcsoportos felmérés tapasztalatai is megerősítették, hiszen az absztrakt fogalmak, szempontok páros összehasonlítása igen sokszor nehézségekbe ütközött. A „kézzel fogható” alternatívák szempontok szerinti összehasonlítása egyszerűbbnek mutatkozott, elsősorban a fűtési alternatívák esetén, ahol a

hétköznapi tapasztalat elősegítette az értékelést. Az alszempontok és alternatívák halmazának felcserélése az ANP módszer matematikai megvalósításában nem igényelt változtatást, azonban a kiértékelésben általánosan használt SuperDecisions Programra (SDS) [42] a manuális adatbevitel és a nagyszámú minta miatt nem támaszkodhattam. A felmérés során a négy főszempont fontossága páros összehasonlítással került meghatározásra. Az összes szempont és az alternatívák kölcsönös értékelése azonban direkt módon, öt pontos skálán valósult meg. (5. ábra)



5. ábra A társadalomtudományi felmérés ANP módszerre épülő szerkezete

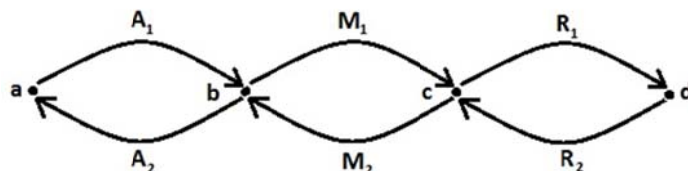
A matematikai megvalósítás abból áll, hogy mindenekelőtt létrehozuk a fő és alszempontok, illetve az alternatívák fontossági arányát tartalmazó, $(r + n + k + 1)$ méretű négyzetes B mátrixot (ún Super Matrix, azaz SM). Az SM mátrix 4×4 tartományra osztható az alszempontok, alternatívák, főszempontok és értékelési szakaszok segítségével. A létrejött 16 tartományból tíz nullmátrix ($O_1, O_2, O_3, O_4, C, C^T, R_1, R_2, R_1^T, R_2^T$), vagyis a kialakított B mátrix erősen hiányos, melynek a hatékony számolás miatt van jelentősége (6. ábra).

	Alszempon r darab	Alternativa n darab	Főszempon k darab	Érték 1 darab
	a	b	c	d
Alszempon a	O_1	A_1	C	R_1
Alternativa b	A_2	O_2	M_1	R_2
Főszempon c	C^T	M_2	O_3	R_3
Érték d	R_1^T	R_2^T	R_3^T	O_4

6. ábra Az $(r + n + k + 1)$ méretű négyzetes B Super Matrix tartományai

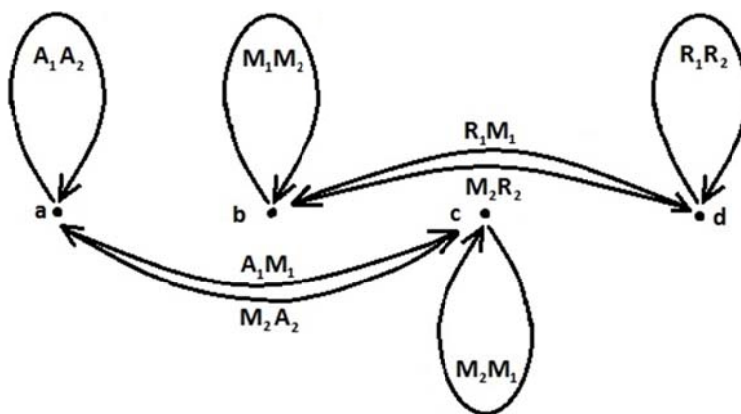
A B mátrixnak azok a tartományai lesznek nullától különbözőek, melyekben az alternatívák értékelése történt a főszempontok (M_1, M_2) és az alszemponatok (A_1, A_2) szerint. Fontos tudni, hogy ezek a tartományok nem egymás transzponáltjai, hiszen a direkt értékelés eredményei a két tartományban első esetben szempontonként, a másodikban alternatívánként lettek normálva. Hasonlóan magyarázatra szorul az O_3 tartomány nulla értéke. Ennek a tartománynak a főszempontok páros összehasonlítási eredményeit kellene tartalmaznia, azonban a hiányok miatt előszámításokat végeztem, mely alapján meghatározott szempontsúlyok közvetlenül az R_3 és R_3^T tartományba kerültek. Az előszámítások során a hiányos páros összehasonlítási adatsor alapján a szempontsúlyokat legkisebb négyzetek, logaritmikus legkisebb négyzetek és sajátérték módszerrel is kiszámoltam. Mivel a sajátérték módszer eredményezte a leginkább karakteres súlyokat (a többi módszer kevésbé eltérő súlyokat adott), így a további számítások során ezeket használtam fel. Az R_3 és R_3^T tartományba tehát a sajátérték módszerrel meghatározott főszempont súlyok aránya került. A szempontok és alternatívák teljes rangsorolásához a B mátrix p^T Perron vektorát kell megadnunk. A B ritka mátrix esetén a Perron vektor kiszámolásának a leginkább kézenfekvő lehetőségét a $\lim_{k \rightarrow \infty} B^k = ep^T$ határérték meghatározása nyújtja. A határérték létezéséhez azonban garantálni kell a mátrix sztochasztikus, irreducibilis, aperiodikus és primitív tulajdonságát. A B mátrix A_1, A_2, M_1, M_2, R_3 és R_3^T tartományainak minden eleme pozitív, így minden oszlop (és sor) tartalmaz nem nulla elemet, tehát a sztochasztikus jelleg az oszlopok egyre normált értékével könnyen kialakítható, létrehozva az ún. „Weighted Matrix”-ot. Az irreducibilitás ellenőrzéséhez a gráfelméleti megközelítéssel kerülhetünk közelebb,

vagyis ellenőriznünk kell, hogy bármely két csúcshoz létezik-e út. Az világos, hogy egy tartományon belül minden csúcshoz elérhető, hiszen a tartomány elemei teljes gráfot alkotnak. Azt, hogy minden tartomány elérhető könnyen beláthatjuk, ha a tartományokat, mint csúcshoz tekintjük, és a B mátrix a négy csúcshoz közötti éleket rögzíti (7. ábra).



7. ábra B mátrix tartományai között lévő kapcsolatok gráf reprezentációja

A primitív tulajdonság garantálása, vagyis, hogy $\exists k \in \mathbb{N}$, hogy $\forall i, j \in \overline{1; (r+n+k+1)}$ esetén a B mátrix minden eleme pozitív, $b_{ij}^{(k)} > 0$, már problémásnak ígérkezik. Mivel a B mátrix főátlójának O_1, O_2, O_3, O_4 , tartományai nullmátrixok, így A_1 tartományból önmagába, tehát a csúcshozból a -ba csak páros lépésszámmal jutunk, míg a -ból b -be csak páratlan lépésszám jöhet szóba. Ezek alapján nem létezik k hatványkitevő, melyre B^k pozitív mátrix, így konvergenciáról sem beszélhetünk. B mátrix minden páros kitevőjű hatványára teljesül azonban, hogy a O_1, O_2, O_3, O_4 , tartományok feltöltődnek, tehát minden csúcshozból eljuthatunk önmagába (8. ábra).



8. ábra B^2 mátrix tartományai között lévő kapcsolatok gráf reprezentációja

A B mátrix páros és páratlan hatványának összevonásával $D^k = \frac{B^{k-1} + B^k}{2}$ könnyen belátható, hogy teljesül a primitív tulajdonság, amennyiben $3 \leq k$. Ekkor D^k mátrix minden eleme

pozitív lesz, tehát minden csúcsból egy lépésben eljuthatok bármely csúcsba, vagyis teljesül az aperiodikus tulajdonsága. Végtelenhez tartó kitevő esetén, a D^k mátrix határértékével a Perron vektor meghatározható. A gyakorlati alkalmazásnál az ezres nagyságrendű minta az adatfeldolgozás egyéni megvalósítását követelte meg, így a mátrixszámításokat Visual Basic környezetben oldottam meg. A gyors konvergencia miatt $k = 10$ iterációs lépés elegendő volt a határérték megállapításához, vagyis az ún. „Limit Mátrix” megadásához. A Limit Mátrixban az azonos oszlopvektorok a Perron vektort szolgáltatják. Segítségükkel az alternatívák és az al- illetve főszempontok egységesített súlyát határozhatjuk meg. Fontos megjegyezni, hogy a bemutatásra kerülő alkalmazás a nagy-mintás döntési problémákhoz sorolható, melynek nem a programozás technikai megvalósítása az igazi kihívás, hanem az eredmények ügyes strukturálása és értelmezése. A fontossági súlyok meghatározása után a további kiértékelés statisztikus és kvantitatív szociológiai módszerekkel történt, azonban ezek eredményeit terjedelmi okokból csupán érintem dolgozatomban.

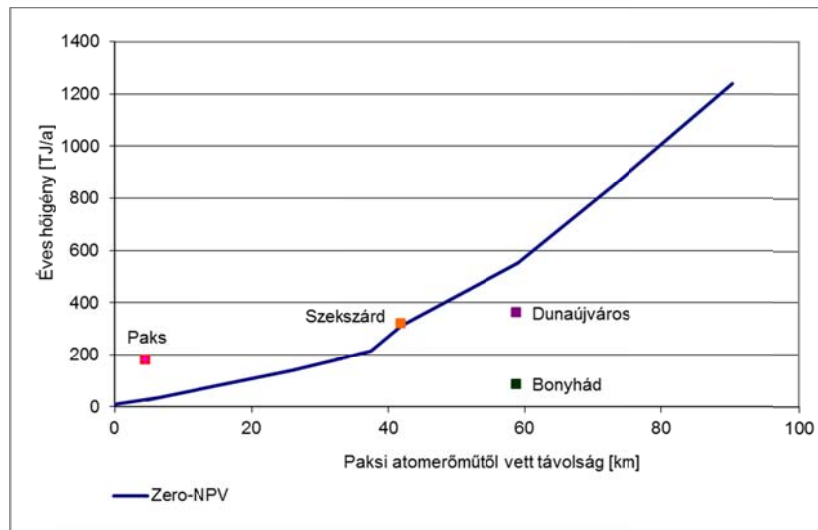
4. Eredmények

Munkám központi témája a hő és a villamosenergia-szektorhoz kapcsolódó forgatókönyvek, döntéstámogatási módszerek felhasználásával történő megszerkesztése. Az optimális forgatókönyvek felkutatása mellett sokszor az elérendő célok és az elvárt feltételek matematikai leírása sem magától érthető, így a legtöbb témát a probléma felvetéstől közelítem meg. Tanulmányom eddigi szakaszaiban a felhasznált általános matematikai módszerek mellett az energetikai felhasználáshoz specializált technikák bemutatása került terítékre. Jelen fejezetben pedig az eddig tárgyalt öt témakör eredményeinek széleskörű vizsgálatára fókuszálhatunk. Három fejezetben energetikai beruházási projektek forrásösszetétel optimalizálását mutatom be eltérő megközelítéssel. A maradék két témakörben egy országos társadalomtudományi felmérés eredményeinek feldolgozásán keresztül ismertetek eljárásokat a döntési szempontok értelmezésére, strukturálására, és szempontsúlyok kialakítására.

4.1. Energetikai forgatókönyvek szerkesztése hátizsák feladatként

Az energia szektorban a villamosenergia-igény kiszolgálása mellett a lakossági hőigény biztosítása kiemelt fontosságú feladat. A hőellátás struktúrája azonban elsősorban decentralizált rendszerű és csak a nagy energiaigény sűrűségű területeken terjedtek el a távfűtési hálózatok. Elsőként a nukleáris kogeneráció bővítésének gazdasági vonatkozását vizsgáltam az atomerőmű közelében lévő kiépített távfűtési hálózatok esetén. Hazánkban egyetlen város van, Paks, ahol az atomenergián alapuló távfűtés elérhető és az ottani átlagos fűtési költségek az országos átlag harmada körül mozognak. Ebből kiindulva, számításaim első körében két kérdést feszegettem: Van-e olyan kiépített távfűtési hálózat a Paks környéki nagyobb településeken, ahol a fosszilis energiahordozót atomenergia alapúra érdemes változtatni, illetve érdemes-e bővíteni más épülettípusokra a távhőhálózatot? A költség-haszon elemzés során a földgáz alapú hőfejlesztés kiváltásának haszonoldali elemeit az alacsonyabb változó költséggel és CO₂ kibocsátással rendelkező nukleáris hő biztosítja. A költség oldal a távvezeték és a hozzá tartozó gépészeti egységek kialakítását összegzi. A költség és a haszon oldal értékére két változó hat döntően, az éves hőigény és a szállítási távolság, míg a többi paramétert (megtérülési idő, diszkontálási állandó, CO₂ kvótaár)

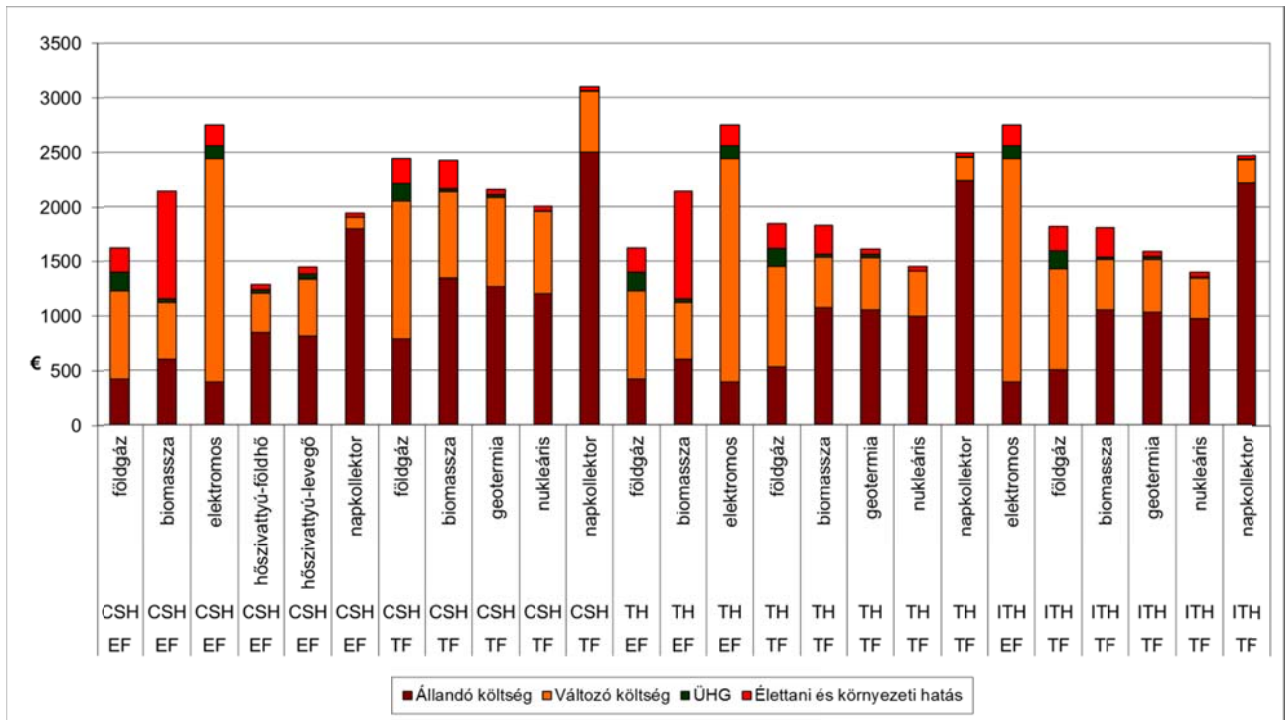
rögzítettnek tekinthetjük. A két változó segítségével felírható egy határgörbe, melynél nagyobb hőigény esetén a beruházás pozitív nettó jelenértékkel (NPV) rendelkezik (9. ábra).



9. ábra CO₂ kibocsátás figyelembe vétele nélküli megtérülési határgörbe, melynél nagyobb hőigény esetén a beruházás megtérül (megtérülési idő: 40 év, diszkontálási állandó: 4%)

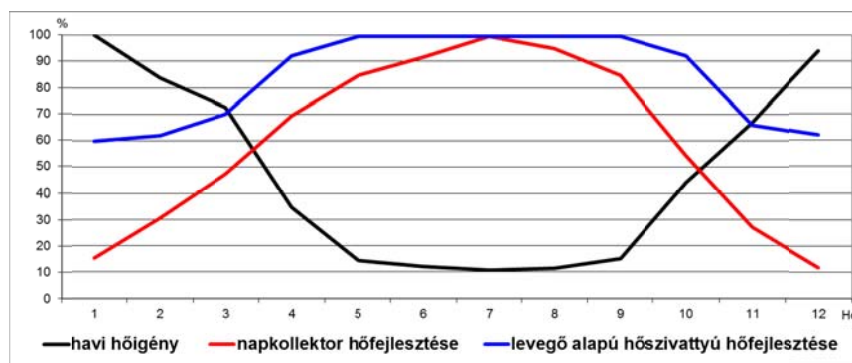
Számításaim alapján két város rendelkezik kiépített távfűtési hálózattal, melynek nukleáris hővel történő közvetlen ellátása gazdaságos lehet, Paks és Szekszárd. Dunaújváros irányába történő fejlesztésnek csupán 25 €/t-nál nagyobb CO₂ kvótaár esetén lenne realitása. A jelenlegi 20-27 €/t kvótaárak és az előrejelzések alapján hosszabb távon érdemes ezt a scenáriót is elemezni, azonban ha a többéves átlagos árból indulunk ki, akkor a nukleáris kogeneráció bővítése csupán Szekszárd irányába gazdaságos. Az elsődleges haszon itt sem a gyors megtérülésben, hanem az ÜHG kibocsátás csökkentésében van.

További megválaszolandó kérdés, hogy a gazdaságos működés javítható-e a hőigény növelésével, ami a jelen esetben a távfűtési hálózat bővítését jelenti. A válaszhoz meg kell vizsgálnunk, hogy a lehetséges fűtési alternatívákhoz képest versenyképes alternatívát nyújt-e a nukleáris távfűtés. A korábban bevezetett három épülettípusú csoportot (családi, társas és ipari társasház) az eltérő hőigénye és fűtési alternatívái miatt külön kezeltem. Az egységes hőigényre vetített összehasonlítás alapján jól látható (10. ábra), hogy a nukleáris fűtés a társas és ipari társasházak esetén versenyképes alternatívát nyújt. A családi házak esetén azonban az alacsony energiaigény sűrűség miatt a távfűtési hálózat kiépítésének magasabb költsége az egyéni fűtésnek kedvez.



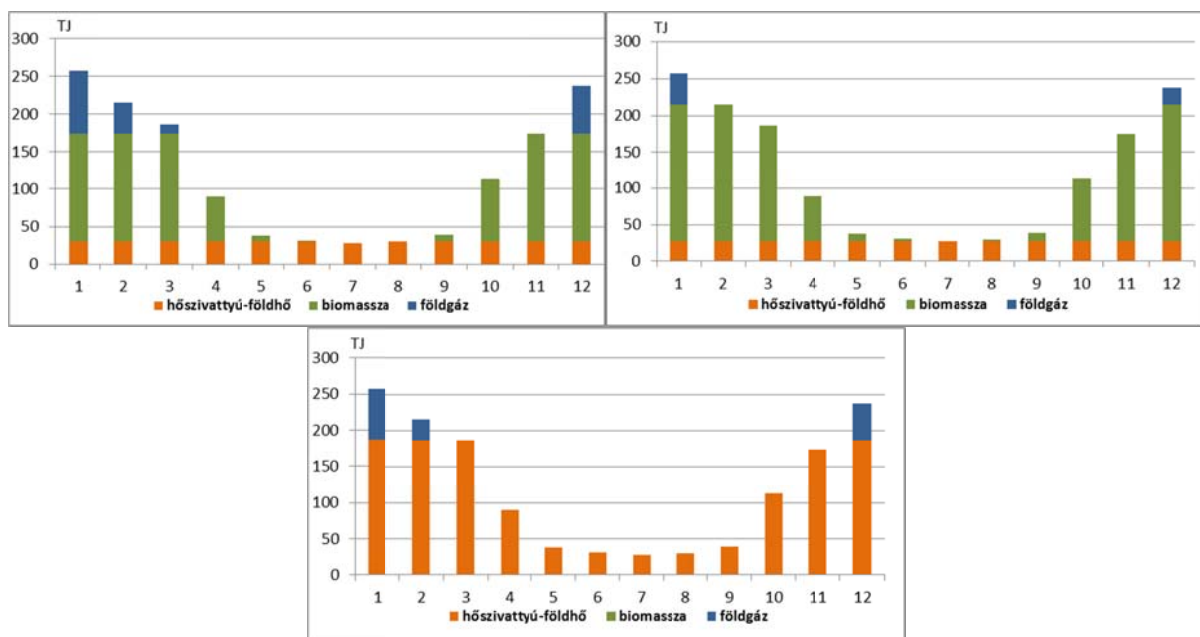
10. ábra Az egységes hőigényre vetített éves költség (140 m²; 10,6 kW), ahol a nukleáris távfűtés állandó költsége tartalmazza a 30km hosszú távvezeték kiépítését. (EF: Egyéni fűtés; TF: Távfűtés; CSH: családi ház; TH: társasház; ITH: ipari társasház)

Az egységes hőigényre vetített költség jól szemlélteti az alternatívák rangsorát, állandó fogyasztás mellett az optimális fűtési módok is kiválaszthatók lennének a segítségével. A szezonális miatt azonban a teljesítményméretezés jóval összetettebb feladattá válik. Számításaim során a fogyasztói oldal havonta változó értékei mellett a napkollektor és a levegő alapú hőszivattyú alternatíváinak a termelési profilját is figyelembe vettem. (11. ábra)



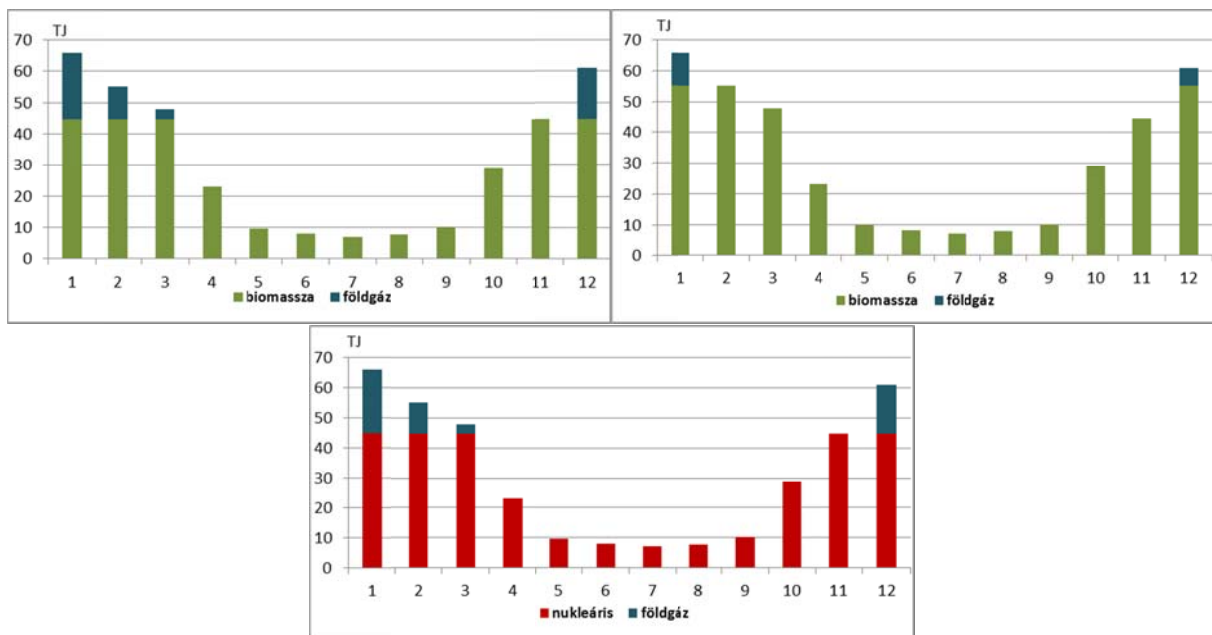
11. ábra Maximumra normált hőfejlesztési és igényoldali profilok

A technológiai alternatívák részletes összehasonlítása lehetőséget nyújt épület tipológiai csoportonként történő hőtermelési portfóliók kialakítására a változó igényoldal figyelembevételével. Az optimális hőtermelési portfóliókat hátizsák és LP feladatként megoldva azonos eredményre jutottam. A családi házak fűtési alternatíváit vizsgálva a három legkisebb állandó és változó költséggel rendelkező egyéni fűtési technológia kap szerepet, biomassza, földhő és földgáz energiahordozóval. A téli csúcsigényt a legkisebb beruházási költséggel rendelkező földgáz alapú fűtés biztosítja, míg az állandó, minimális ellátást a földhő alapú hőszivattyúk adják. A köztes részt, a szigorúan csak nyáron kieső hőforrást a biomassza tüzelés nyújtja a közepes állandó költségével. A széndioxid ár (17 €/t) figyelembevétele esetén az energiahordozóknak csupán az aránya változik meg. A portfólióban a földgáz alapú 64 MW beépített kapacitás megfelel a közel állandó 23 MW földhő alapú beépített kapacitás mellett. A klímahatás és a gazdasági adatokon túl, az élettani hatások figyelembevételével a jelentős beépített kapacitással rendelkező biomassza égetés (112 MW) kiszorul az energiamixből és helyét a 145 MW-ra felduzzadt beépített földhő kapacitás veszi át (12. ábra).



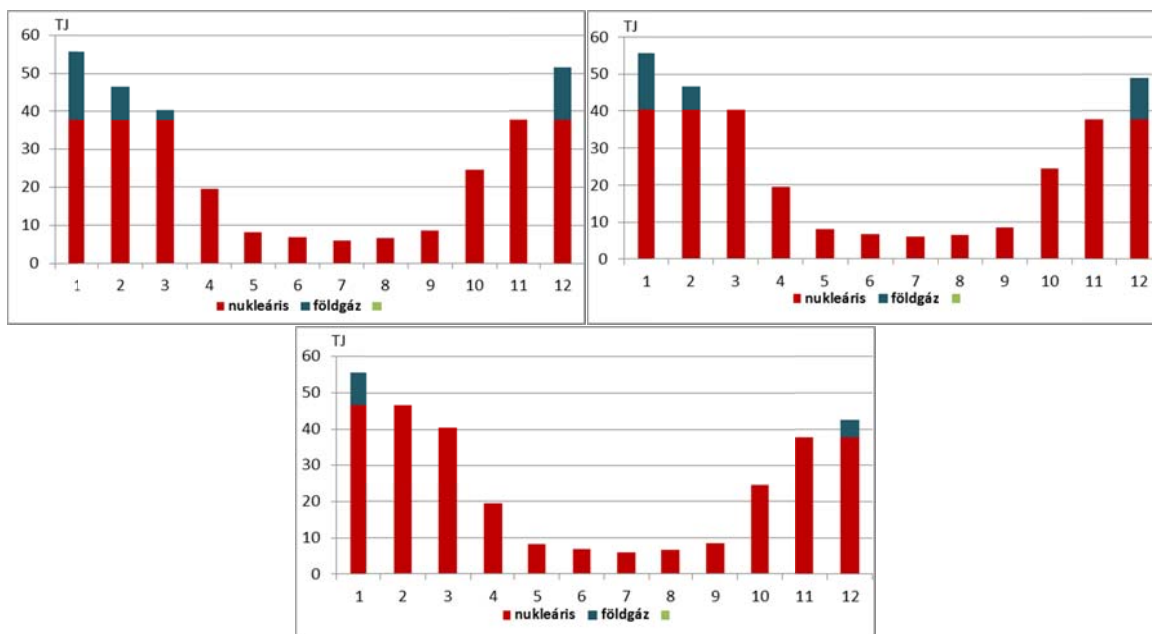
12. ábra Családi házakhoz kapcsolódó hőtermelési portfóliók havi felbontásban. Csupán állandó és változó költséggel számolva (balra); a hozzáadódó széndioxid kvótaár figyelembevételével (jobbra), illetve környezeti hatások externális költségével kiegészítve (lent).

A társasházak esetén a nagyobb beépítettség szűkíti az elérhető technológiai alternatívák körét, ugyanakkor a nagyobb hőigény sűrűség gazdaságilag vonzóbbá teszi a távfűtést. A csúcsgényt itt is a legolcsóbb beruházási költséggel rendelkező földgáz alapú fűtés biztosítja 17 MW beépített teljesítménnyel, ami a széndioxid ár figyelembevételével ismét megfelelő és helyét teljes egészében a biomassza alapú egyéni fűtés tölti ki. A biomassza égetés fokozottan káros élettani hatásai miatt a környezeti externáliák értékelésbe történő bevonásával a 35 MW beépített kapacitással rendelkező biomassza égetés nukleáris alapú távfűtésre cserélődik (13. ábra).



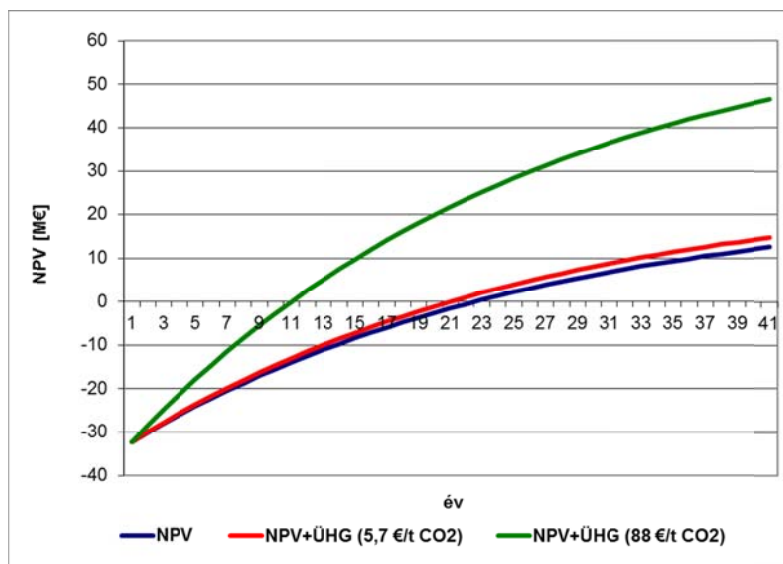
13. ábra Társasházakhoz kapcsolódó hőtermelési portfóliók havi felbontásban. Csupán állandó és változó költséggel számolva (balra); a hozzáadódó széndioxid kvótaár figyelembevételével (jobbra), illetve környezeti hatások externális költségével kiegészítve (lent).

Az ipari társasházak esetén a versenyképes, reálisan megvalósítható hőtermelési alternatívák között már csak távfűtés szerepel, és mindössze két energiahordozó, az atomenergia és a földgáz marad versenyben változó aránnyal a portfólióban. A csupán állandó és változó költséggel végzett modellezés során a 29 MW beépített teljesítményű nukleáris alapú hőtermelést a csúcsgépnél 14 MW beépített teljesítményű földgáz alapú hő egészít ki. A széndioxid ár figyelembevételével a nukleáris hő aránya megnő (31 MW), ami az élettani hatások becsülésével egészen 36 MW beépített kapacitásig emelkedik (14. ábra).



14. ábra Az ipari társasházakhoz kapcsolódó hőtermelési portfóliók havi felbontásban. Csúpan állandó és változó költséggel számolva (balra); a hozzáadódó széndioxid kvótaár figyelembevételével (jobbra), illetve környezeti hatások externális költségével kiegészítve (lent).

A távhőfejlesztési lehetőségek mérlegelésénél kiváló támpontot nyújthatnak az eredményeink, elsősorban a méretezés kapcsán. A három tárgyalt scenárió eredményei azonban fontos figyelmeztetést is jelentenek, és rámutatnak az értékelési szempontok megválasztásának és számszerű értékelésüknek a szerepére. A klíma és a környezeti hatások monetarizált költsége az alkalmazott módszertani eltérések miatt akár szélsőségesen különbözhet, hasonló bizonytalanság jellemzi a beruházási és üzemeltetési költségeket is. Az eredmények értelmezéséhez ezért szorosan kapcsolódik annak a vizsgálata, hogy a bemenő adatok bizonytalansága mennyire teszi instabillá a megoldásokat. A megoldások stabilitását a legtöbb esetben parciális érzékenységvizsgálattal valósítják meg, ahol a legkritikusabb paraméter megváltoztatásának a következményei kerülnek tanulmányozásra. Ezért a szekszárdi távfűtés esetében a megtérülési számításokat különböző széndioxid árral is elvégeztük (15. ábra).



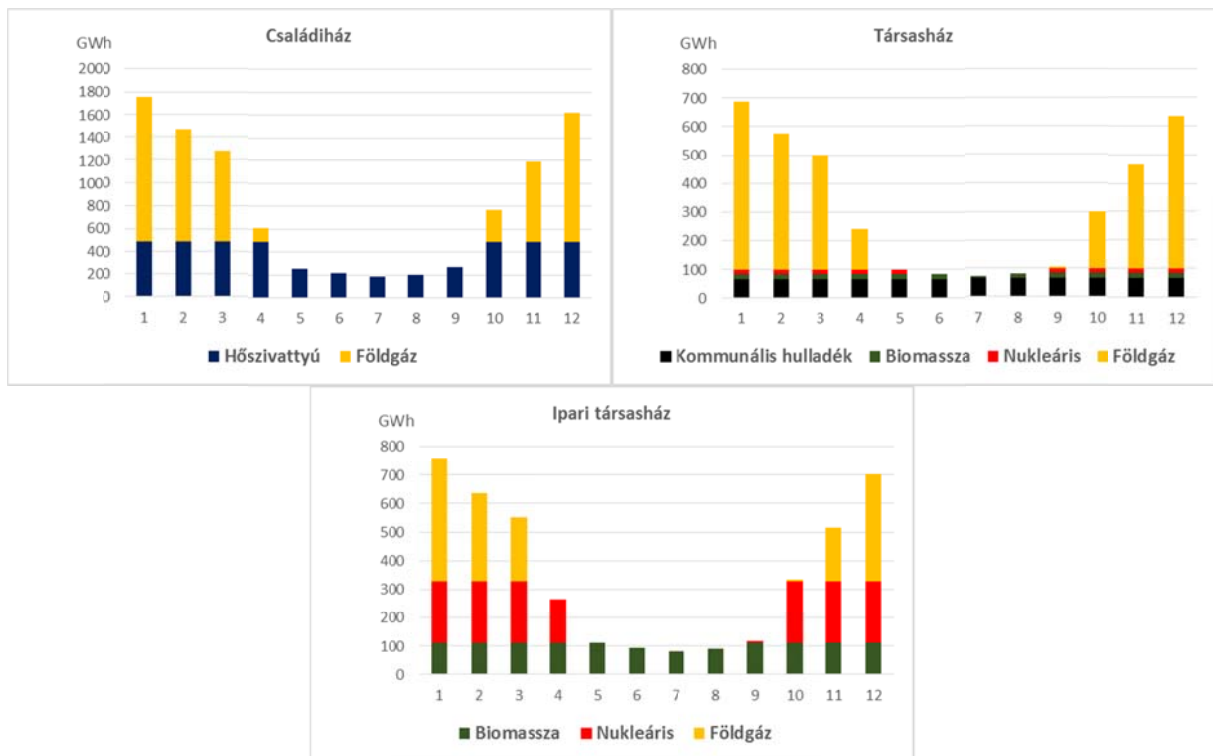
15. ábra A nettó jelenérték alakulása különböző széndioxid ár értékekkel az élettartam idejére

Ez alapján kijelenthető, hogy a 10 éves megtérülési idő 88 €/t széndioxid ár esetén elképzelhető, a klímahatás mellőzése esetén azonban több mint 20 év alatt fordul pozitívrá a nettó jelenérték. Egy befektetés pénzügyi kockázatának az elemzésére a parciális érzékenységvizsgálat alkalmas lehet, azonban energetikai forgatókönyvek stabilitásának a tanulmányozásához inkább a többcélú optimalizálás alkalmazható.

4.2. Energetikai forgatókönyvek szerkesztése többcélú optimalizálással

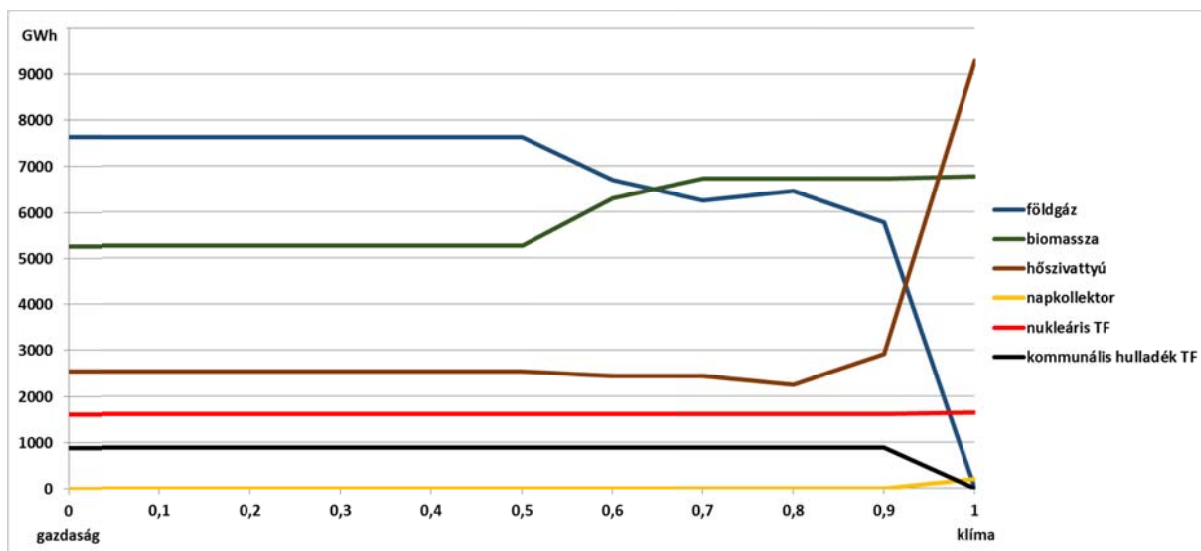
A második szakaszban Budapest fűtésének és használati melegvíz előállításának optimális forgatókönyve kerül tárgyalásra, melyet a FŐTÁV tanulmánya inspirált [43], s amely a rövid és középtávú budapesti terveket mutatja be. Itt a versenyképesség növelésének a kulcsaként a szeparált hálózatok összekötése, a piacnövelés, valamint az olcsó energiaforrások felhasználása kerül említésre. Munkámban az előző fejezetben kidolgozott modellt alkalmaztam Budapest városára. Összefüggő távhálózatot feltételezve kerestem a piacnövelés lehetőségét és az optimális energiaforrásokat. A piacnövelés területeinek a feltérképezéséhez mindhárom korábban tárgyalt épülettípológiai csoport modellezésre került a hozzájuk kapcsolódó 28 fűtési alternatívával. A hulladék egy speciális energiaforrás a

fővárosban, ahol az égetőmű igen magas beruházási és karbantartási költsége negatív üzemanyagárral párosul. Hasonlóan magas beruházási költséggel rendelkezik az atomenergia alapú távhő a 135 km hosszú, előszigetelt vezetékpár és a szivattyúállomások megvalósítása miatt, míg az üzemanyagár a hő és keringtetési veszteséggel is igen kedvező marad. A két hőforrás elsősorban az alapterhelés biztosításáért versenghet, míg a csúcsigényt az alacsonyabb beruházási költséggel rendelkező alternatívák uralják. Fontos mérlegelési szempont továbbá a fűtési alternatívák összehasonlításánál a környezeti hatás és ezen belül az élettani hatás, mely közel sem elhanyagolható a városokra jellemző nagy népsűrűségű területeken. A harmadik összehasonlítási szempontként a széndioxid kibocsátás szerepel, amely a növekvő globális átlaghőmérséklet kapcsán vált minden döntéshozatalnál központi elemmé. A budapesti havi hőigény biztosítására a három felsorolt szempontnak leginkább megfelelő hő portfólió meghatározását tűztem ki célul, épülettípológiai csoportonként. Az optimális hő portfóliót disztribúciós feladat formájában kerestük. Az első megközelítésben a három szempontot monetarizált értékek alkalmazásával vontam össze a célfüggvényben. A gazdasági, környezeti és klímahatás monetarizált értékének egysége azonos, azonban skálázásuk lényegesen különböző lehet. A monetarizált értékekről általánosan állíthatjuk, hogy bennük a gazdasági szempontok dominálnak, a környezeti hatások csupán tized akkora súllyal járulnak a célfüggvény értékéhez. Az arányokat jól szemlélteti a klímahatás széndioxid kvótával monetarizált értéke, aminek kevesebb mind egy század a járuléka a célfüggvényben. Ezek alapján a monetarizált skálázásra elsősorban mint gazdasági megközelítésre tekinthetünk. (16. ábra)



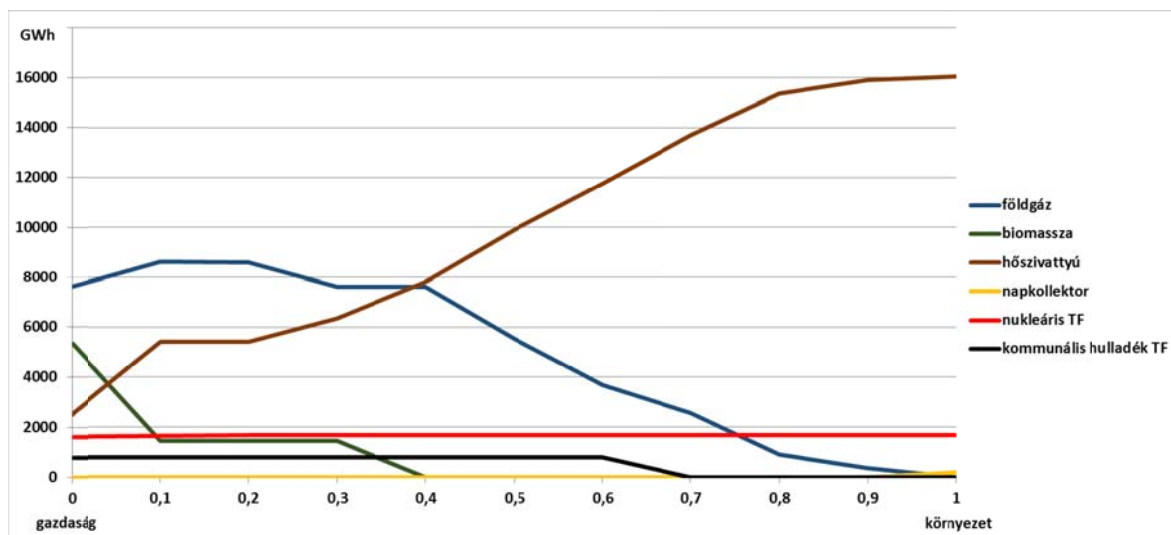
16. ábra Monetárizált szempont értékekkel modellezett ideális hőportfólió

A bemutatott eredmények alapján a családi házak optimális hőtermelése kiemelt hányadban támaszkodik földhő és levegő alapú hőszivattyúkra, csupán a téli csúcspozícióknál veszi igénybe a jóval szerényebb beruházási költséggel megvalósítható földgáz alapú fűtést. A társasházakat sok tekintetben együtt érdemes vizsgálni az ipari társasházakkal, hiszen az eredményül kapott hőellátás távfűtéssel (TF) valósul meg mindkét esetben. A távfűtésben az állandó, minimális ellátást a kommunális hulladék és biomassza égetés biztosítja. A téli csúcspozíciót itt is földgáz alapú egyéni, illetve távfűtés biztosítja az épületekben. A köztes rész, vagyis az átmeneti és téli időszak hőigénye atomenergia alapú távfűtéssel valósul meg. Az ideális portfólió összeállításánál a három értékelési szempont között a fontossági kompromisszumot igen egysíkúan mutatja meg a monetárizált megközelítés, ezért a problémát többcélú optimalizálással is megközelítem. A megoldások áttekinthetőségének érdekében egyszerre két kiemelt szempont esetén szemléltetem az energiahordozónként összevont éves hőtermelést, vagyis a multiobjektív egységssimplex oldalait (17. ábra).



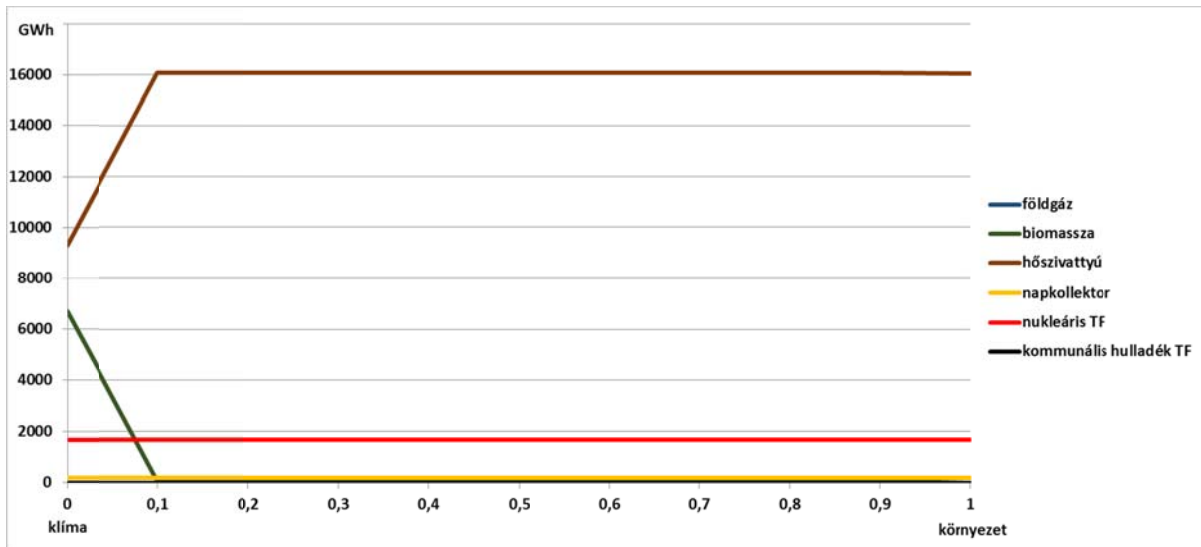
17. ábra Budapest hőtermelési portfóliójának energiahordozók szerint aggregált értéke gazdasági és klímahatás változó szempontsúlyainak figyelembevételével.

Az eredményül kapott hőtermelési portfóliók változó szempontsúlyok szerinti ábrázolása kiváló eszközt nyújtanak az érzékenységvizsgálat elvégzéséhez. A gazdasági és klímahatási szempontokra fókuszálva megállapítható, hogy a nukleáris és a kommunális hulladékból származó hő szinte minden esetben a potenciál korlátig feltöltésre került. A meglepően stabil eredményekben intenzív változást csupán a klímahatás szélsőséges kiemelésével idézhetünk elő. Amennyiben az ÜHG csökkentését határozzuk meg egyetlen célként, akkor a fosszilis támasztófűtéssel rendelkező kommunális hulladék és a földgáz égetés szerepét a föld és levegő alapú hőszivattyúk, illetve szerény potenciállal rendelkező napkollektorok veszik át. Fontos megemlíteni azonban a biomassza égetést is, melynek szerepe tisztán gazdasági szempontok esetén sem elhanyagolható, azonban klímasemleges energiahordozóként igen gyorsan eléri a maximálisan rendelkezésre álló potenciált. A vázolt többcélú optimalizálási modellben a klímahatás súlyfaktorának emelkedését úgy is felfoghatjuk mint a széndioxid kvótaár növelését. A monetarizált szempontoknál alkalmazott 5 €/t_{CO2} költségekből kiindulva megállapítható, hogy közel 300-400 €/t_{CO2} széndioxid kvótaár esetén vennék át a hőszivattyúk a földgáz szerepét. A gazdasági és a környezeti hatások figyelembevétele esetén a korábbihoz nagyon hasonló tendenciák rajzolódnak ki. (18. ábra)



18. ábra Budapest hőtermelési portfóliójának energiahordozók szerint aggregált értéke fűtési típusonként, szempontsúlyok alkalmazásával a gazdasági és a környezeti hatások figyelembevételénél.

Az elsődleges különbség ekkor abban mutatkozik meg, hogy a biomassa igen gyorsan elveszti dominanciáját a portfólióban. A környezeti hatások kiemelt figyelembevételkor a föld és levegő alapú hőszivattyúk először a biomassa, majd a földgáz helyét veszik át. Megállapítható, hogy a nukleáris hő a teljes egységsszimplexen a potenciál értékének maximumát veszi fel, azonban a hulladékégetőmű által szolgáltatott távhő a tisztán környezeti hatások figyelembevételénél kiszorul az energiamixből. A bemutatott portfóliókról fontos tudni, hogy a tisztán környezeti, illetve klímahatást figyelembevevő megoldások sok tekintetben teljesen elrugaszkodnak a valóságtól azzal, hogy beruházási költség nélkül csupán a rendelkezésre álló potenciál korlátozza a beépített kapacitás mértékét. Ez elsősorban az atomenergia és a napkollektor hasznosításnál szembeötlő. (19. ábra)



19. ábra Budapest hőtermelési portfóliójának energiahordozók szerint aggregált értéke fűtési típusonként, szempontsúlyok alkalmazásával a környezeti és a klímahatások figyelembevételénél.

Lemondva a szigorú potenciál korlátokról, a klíma szempont kihangsúlyozásakor az atomenergia válna egyeduralkodóvá, míg a környezeti szempont esetén a napkollektor. A gazdasági szempont kiemelésével pedig a kommunális hulladék égetés lépne át a korlátozó feltételeit. A vázolt eredmények rámutatnak az értékelési szempontsúlyok portfólióra gyakorolt jelentős hatására, ugyanakkor a potenciál korlátok kiemelt szerepére is. A rendelkezésre álló energiapotenciálok definiálásának egy plasztikusabb megközelítését adja munkám harmadik témaköre, melyben a hazai megújuló energiaforrások ideális forráskiosztását kerestem.

4.3. Költség bizonytalanságok kezelése nemlineáris optimalizálással

Munkám harmadik témakörében a hazai megújuló energiaforrások optimális portfóliójának meghatározását tűztem ki célul. Kiindulásként Magyarország primer energia felhasználását éves szinten 760 PJ -nak fogadtam el, melynek 75%-t az elektromos és a hőszektor adja. A jelenlegi szabályzás szerint a két szektorban együttesen 97,5 PJ energiát megújuló forrásból kell biztosítani. Az energiatermelési alternatívákat három fő csoportba soroltam. A tisztán villamosenergia-termelő szél, víz és napsugárzás alapú egységekre,

figyelembe véve a méretlépcsőket kilenc alternatívát kapunk. A hő és villamosenergia-termelő kapcsolt erőművekre, azaz a kogenerációra alkalmas csoportba, melyeknél a hőt biomassza, biogáz vagy hulladéktüzelés, illetve geotermikus energia biztosítja, tíz alternatíva került. További hét alternatíva tisztán hőtermelést valósít meg napsugárzás, talajhő vagy biomassza égetés felhasználásával. A disztribúciós feladat korlátozó feltételeit az éves, országos villamosenergia-igény mellett (3. táblázat) az épülettípológiai csoportok megyei szintű hő felhasználása, illetve a rendelkezésre álló megújuló energiahordozó potenciál megyékre vetített értéke adta. A megyei felbontást a megújuló energiahordozók csekély energiasűrűségével összefüggő szállítási nehézségek, illetve a hőtranszport költséges volta indokolta. A kialakított modellben tehát a megújuló energiaforráson alapuló hőt lokális potenciálból biztosítottam, míg a villamosenergia-ellátás a kiterjedt átviteli hálózatnak köszönhetően globális szinten valósult meg.

3. táblázat A hő és villamosenergia-igény épülettípológiai csoportok szerint.

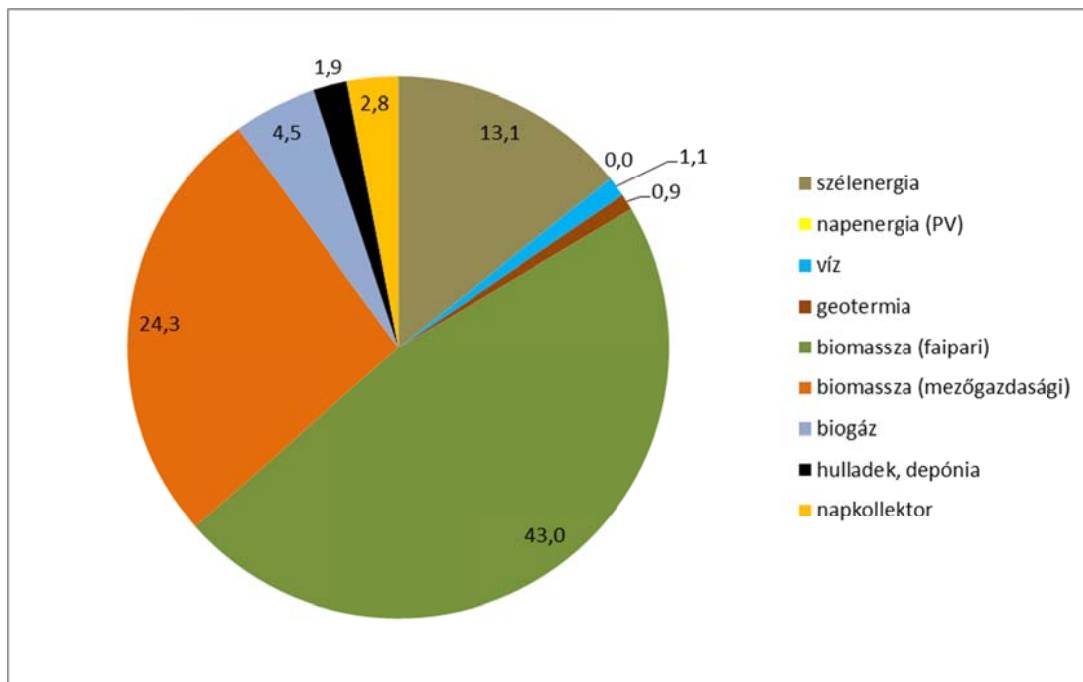
	Villamosenergia- igény	Hőigény Családi ház	Hőigény Társasház	Hőigény Ipari társasház
PJ	197,6	283,7	49	40

Az optimális portfólió meghatározásához felhasznált célfüggvénynek az együtthatói az első megközelítésben csak a fajlagos LCOE költségek alapján kerültek definiálásra. A fajlagos költségeket valós megvalósult projektek adatai alapján határoztam meg. Mivel a tanulmányozott beruházások eltérő infrastrukturális környezetben valósultak meg, így a fajlagos költségek roppant széles intervallumban mozognak, két, akár háromszoros árkülönbségek is kialakulhatnak (4. táblázat). Tetszőleges középérték kiválasztása helyett a teljes költségintervallum felhasználása sokkal több információt nyújthat a valós piaci környezetről. Ezek alapján a disztribúciós modell célfüggvényben a költségintervallumon a rendelkezésre álló potenciál kimerülésének függvényében lineárisan növekvő árakkal dolgoztam. A vázolt megközelítéssel először mindig az infrastrukturálisan legkedvezőbb környezetben történtek meg a beruházások.

4. táblázat A megújuló energiahordozók fenntartható potenciáljának országos értékei, továbbá a technológiától és méretlépcsőtől elvonatkoztatott fajlagos költségek minimum és maximum értékei.

	Szél	Napelem	Víz	Geotermia	Biomassza	Biogáz	Kommunális hulladék	Napkollektor	Hőszivattyú
fenntartható potenciál (PJ)	14	7	1,3	6,1	149	4,5	2,2	10,6	15
min. fajlagos költség (€/MWh)	61,4	110,8	77,7	30,6	44	26,1	85,5	35,3	30,6
max. fajlagos költség €/MWh	152,6	224	118,4	100,7	108,6	34,9	115,2	69,2	69,2

Számításaim során a rendelkezésre álló potenciál értékeknek a legszigorúbb elvárásnak eleget tevő fenntartható potenciált fogadtam el. Mivel a hazai teljes fenntartható potenciál érték (209,5 PJ) csupán duplája a 2020-tól vállalt kötelezettségünknek, így az energiamix kialakítására minimális mozgástér marad. A rendszerbe építhető energiaforrások szerény tartalékai miatt a legtöbb alternatívának csak a korlátozó feltételek szabnak határt. Eredményeim alapján, amennyiben csupán a gazdasági szempontokat tartjuk szem előtt, az optimális portfólióból a családi házak jelentős állományának magas hőigénye és a biomassza könnyű elérhetősége miatt több, mint 65 PJ-al a fa és mezőgazdasági melléktermék tüzelés veszi ki a részét (20. ábra). A többi megújuló energiahordozó nagyvonalakban egyenletes arányban szerepel, egyedül a napelemes rendszerek estek ki a portfólióból magas fajlagos költségük miatt. Érdekessége a modell alapján előállított energiamixnek, hogy csupán az egyik energiahordozó (szennyvíz alapú biogáz) merítette ki a teljes potenciál keretét. A tisztán gazdasági megközelítésnél az átlagos energiaköltség 6,71 c€/kWh értékben stabilizálódik.



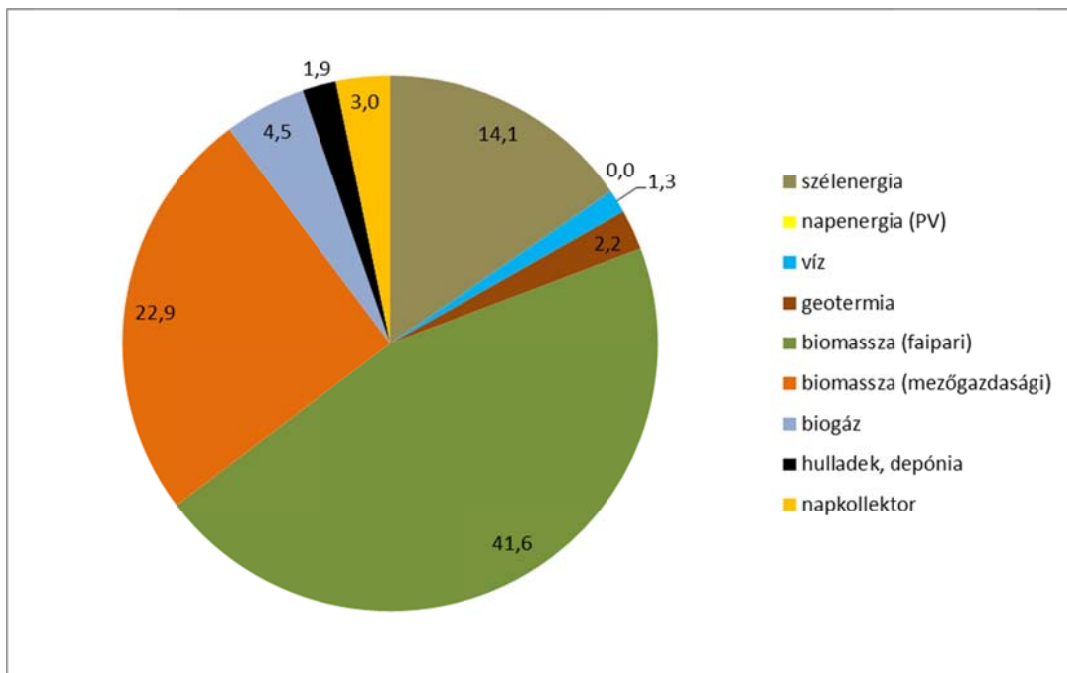
20. ábra A hazai megújuló energiaforrások optimális portfóliója tisztán gazdasági szempontok figyelembevételére esetén

Amennyiben a korábbi eredményekhez hasonlóan környezeti és klimatikus szempontokat is be szeretnénk vonni az értékelésbe, akkor szakítanunk kell azzal az idealizált elképzeléssel, hogy a megújuló energiaforrások minden káros hatást nélkülöznek. A megújuló energiaforrások felhasználásának környezeti, élettani, illetve klimatikus hatásai különböző technológiákra vonatkozóan jelentősen eltérhetnek. Ezeknek a hatásoknak a monetarizált értékeit életciklus-analízis fajlagos kibocsátási adatai alapján hatásútvonal megközelítéssel, az emberi egészségre, mint receptorra számolt külső költségekként vettem figyelembe. A tüzelésen alapuló üzemanyagciklusok esetében a szűken vett energiatermelési szakasz adja a károk legnagyobb járulékát, de a legtöbb megújuló energiahordozó esetén valós képet csak az egész életciklushoz kapcsolható (erőmű szerkezeti elemeinek gyártása, szállítása, üzemanyag-előállítás, erőmű felépítése és leszerelése) környezeti és élettani károk figyelembe vétele ad. Munkámban a környezeti és élettani hatások becsléséhez a *CASES* projekt keretében [44] a 2020-as technológiákra meghatározott külső költségekből indultam ki, míg a klimatikus hatások összehasonlításánál az üvegházhatású gázok fajlagos kibocsátását vettem alapul [45] (5. táblázat).

5. táblázat Fajlagos széndioxid kibocsátás, valamint a környezeti és élettani hatás számszerűsített értéke

		Szél	Nap (PV tető)	Víz (kicsi)	Geotermikus erőmű	Biomassza (faapríték)	Biomassza (szalma)	Napkollektor
környezeti és élettani hatás	Ec/kWh	0,09	1,00	0,09	0,98	1,15	2,86	0,48
klímahatás	g CO ₂ eq/kWh	12	46	4	45	18	18	22

Az optimalizálás során felhasznált teljes költségekben a megújuló energiaforrások klimatikus hatásának a járuléka jelentéktelen, még a hosszú évek kvótaár átlagánál magasabb értékkel (17 €/tCO₂) számolva is. Az externális költségek figyelembevétele esetén nem történik jelentős átrendeződés az optimális portfólióban. Az energiahordozók közötti arányok csupán csekély mértékben változnak, ugyanakkor két új energiaforrás (víz, szél) is teljesen kimeríti az országos potenciál értéket (21. ábra). A szerényen mérséklődő biomassza felhasználás elsősorban az egyéni fűtés károsanyag-kibocsátásával és a vele szorosan összefüggő romló élettani hatással magyarázható. Az optimális energiamixhez kapcsolódó átlagos energiaköltség 8,22 c€/kWh értékre emelkedik.



21. ábra A hazai megújuló energiaforrások optimális portfóliója gazdasági, klimatikus, élettani és környezeti hatások figyelembevétele esetén

A végeredményként bemutatott portfóliók sok tekintetben összecsenenek egyéb modellekkel előállított ideális energiamixekkel, azonban a bemutatott megközelítés erőssége, hogy a kvadratikus célfüggvény együtthatókkal fölírt NLP feladat finomabb átmenetet biztosít a megoldások között, mint a klasszikus disztribúciós probléma LP felírása, ahol minden alternatíva értéke kvantált, vagyis a nulla érték mellett a potenciál vagy egyéb korlátok maximumát vehetik fel. Problémát jelent, hogy kisszámú feltétel esetén az ilyen jellegű megoldások nem nyújtanak életszerű eredményt. További fontos képessége a modellnek a piac telítődésének kezelése, melyre a beépített potenciállal lineárisan növekvő árak segítségével tesz kísérletet. Meg kell jegyezni azonban, hogy a probléma egzakt leírásához a potenciál-költség függvény jellegének pontosabb felderítése szükséges, ami további elemzéseket igényel minden egyes alternatívára vonatkozóan. Ezen a téren nehézséget jelent az, hogy a legtöbb beruházási projekt gazdasági adata nehezen hozzáférhető, így a statisztikai megközelítés problémás.

4.4. Értékelési szempontrendszer kialakítása döntéstámogatási problémákban

Az eddigi fejezetekben a többcélú optimalizálás keretében legfőljebb öt szempont került mérlegelésre. A két gazdasági szempont közül a beruházási és az üzemelési költség, továbbá fontos szerepet kapott a klímahatás, illetve a környezeti és élettani hatások, melyeket a legtöbb esetben összevonva kezeltem. Az energetikai projekteknél a felsorolt öt szempont figyelembevétele alapvető az alternatívák rangsorolásánál, azonban egy felelősségteljes döntéshez ennél jóval több szempont mérlegelése szükséges. Ebben a szakaszban egy társadalmi felmérés alapján kirajzolódó, energetikai döntésekhez illeszthető értékelési szempontrendszert és fontossági rangsorukat mutatom be. A társadalmi felmérés két szakaszból állt, egy kvalitatív részből, melynek elsődleges feladata a szempontok összegyűjtése volt, valamint egy kvantitatív szakaszból, ahol már a cél a szempontsúlyok meghatározása volt. A kvalitatív felmérés keretében 8 fókusz-csoportos beszélgetés zajlott nagyvárosi és vidéki helyszíneken. A csoportok kialakítása szocio-demográfiai változók, vélemény-, illetve ismeretcsoporthoz tartozás alapján történt, ügyelve arra, hogy a főbb épület és fűtés típusok felhasználói reprezentálva legyenek. A fókusz-csoportos vizsgálat során az energetikával összefüggő legfontosabb tudományos fogalmak általános jelentéstartalma vagy

épp annak hiánya került tanulmányozásra. A különböző korú, nemű, iskolai végzettségű, lakóhelyű emberek csoportos beszélgetései alapján nem általánosítható vélemények kerültek elő, hanem az egyes, vizsgálni kívánt problémákkal kapcsolatos mélyebb ismeretek vagy éppen hiedelmek. A fókuszcsoportokban a témavezető által és spontán módon felvezetett fogalmak, energiatermelési alternatívákat, technológiákat, illetve a hozzájuk kapcsolódó értékelési szempontokat érintettek. A beszélgetések során a ráhangoló kérdésektől kiindulva az általános szinttől jutottak el a csoportok a konkrétumok felé, a beszélgetések legvégén került sor a felmérés második részében tervezett kérdőív néhány kérdésének megválaszolására. A dokumentált beszélgetések feldolgozott eredményeinek a segítségével a kérdőív kérdései úgy kerültek megfogalmazásra, hogy az általános lakossági minta tagjai számára is érthető legyen. A vizsgálati mód arra is lehetőséget biztosított, hogy a kérdőív bonyolultabb kérdéstípusainak a használhatósága is tesztelésre került. A beszélgetések során megemlített szempontok között sok esetben szinonimák, hasonló jelentésű vagy negált kifejezések kerültek említésre, melyeknek a tematikus csoportosítása önmagában is nehézséget okozott, azonban egységesítésük komoly kihívást jelentett. A fogalmak és szempontok csoportosításának első megközelítésénél csupán az energiatermelési-alternatívákhoz kapcsolódó pozitív és negatív fogalmak halmazát és annak számosságát vizsgáltam. (6. táblázat)

6. táblázat Fókuszcsoportos beszélgetések során megemlített fogalmak, szempontok energiatermelési-alternatívák jelentéstartalom alapján történő csoportosítása

	Nap	Szél	Földgáz	Tűzifa	Elektromos	Nukleáris	Víz	Geotermia	Szén	Fűtőolaj	Távfűtés
pozitív asszociáció	17	4	5	7	9	5	4	5	3	1	4
negatív asszociáció	15	4	15	19	4	12	4	11	13	16	3

Az így kapott alternatíva csoportok szépen tükrözik a társadalom fosszilis energiahordozókkal kapcsolatos kritikus véleményét, és nem meglepő módon az atomenergia hasznosítás elutasítottságát is. A klasszikus megújuló energiaforrásoknál a pozitív és negatív szempontok kiegyenlítettek, míg a villamos energia felhasználást kifejezetten kedvező fogalmak övezik. Elgondolkodtató a biomasszához kapcsolódó negatív fogalmak kiemelkedő száma, mely előrevetíti a szempontok tematikus csoportosításánál az élettani és környezeti hatások hangsúlyosságát. (7. táblázat)

7. táblázat Fókuszcsoportos beszélgetések során megemlített fogalmak, szempontok tematikus csoportosítása.

	Hatások az egészségre és a környezetre	Ellátásbiztonság	Költségek	Üzemeltetés	Veszélyes	Logisztika és tárolás	Támogatások és szemléletformálás
háztartás	29	22	21	19	11	3	1
országos	37	25	24	12	14	9	36

A háztartási és országos energiatermeléshez kapcsolódó fogalmak számossága alapján az élettani, környezeti, az ellátásbiztonsági és a gazdasági szempontok közel egyenrangú értékelési csoportokat alkotnak, ugyanakkor a maradék négy halmaz számossága sem elhanyagolható. A csoportokhoz kapcsolódó fogalmak száma természetesen nem alkalmazható szempontok fontossági rangsorolására, sokkal inkább a közbeszéd tematizáltságát tükrözi. Talán ezt támasztja alá a támogatások gyakori említése is, mely a politikai retorika médiumokban megjelenő fontos eleme. A fókuszcsoportos beszélgetések nyers eredményei azonban további vizsgálatokra nem voltak alkalmasak. Az összegyűjtött 55 fogalmat átfedésektől megtisztítva 35 szempontra egyszerűsítettem. A kialakított szemponthalmazt két csoportra osztottam, az önállóan értelmezhető elemi, avagy alszempontokra és a szélesebb fogalomkört magába foglaló összetett vagy főszempontokra. Ez a megtisztított és csoportosított szemponthalmaz adta az alapját a kérdőíves felmérésünknek, ahol a szempontok minden esetben pozitív formában szerepeltek a jobb összehasonlíthatóság érdekében (tájképrombolás helyett pl. harmonikusan illeszkedik a környezetbe). Tanulmányomban azonban a szakirodalomban megszokott kompakt kifejezésekhez térek vissza. A kvantitatív vizsgálat alapja egy korra, nemre, iskolai végzettségre és lakóhely típusra reprezentatív országos 1000 fős mintán végzett kérdőíves adatfelvétel volt, mely 2018-ban valósult meg. A mintavételben résztvevő települések listája és az alkalmazandó kvóta a KSH Népszámlálás adatai alapján került kialakításra. A megkérdezések a települések szélén, községi részén, átmeneti övezetében és centrumában zajlottak, figyelembe véve az épület állomány és a fűtési rendszerek eltérését. A felmérésben szétválasztottuk a háztartási és ipari szintű energiafejlesztést, az első kifejezetten a fűtési szektorról szólt, ahol a válaszadók személyes tapasztalataikat fogalmazhatták meg, míg a második részben a villamosenergia-termelés globális értékelését vártuk. A kérdőívek öt

szakaszból álltak, melyből három szocio-demográfiai kérdéseket tartalmazott (II. melléklet). A felvezető kérdések korra, nemre, iskolai végzettségre és a háztartásban felhasznált energiahordozók fajtáira kérdeztek rá. A második blokk az energiaszegénységhez kapcsolódó kérdésekből állt, mely a villamos energia és hőtermelési alternatívák közvetlen értékelését választotta el egymástól. A záró kérdések a háztartások által alkalmazott fűtési technológiákat és fizetési hajlandóságot mérték fel. A megvalósított felmérés a villamos energia és hőtermelési alternatívák közvetlen értékelését a megszokott kérdőív struktúrától eltérően közelítette meg. A válaszadók a soronként szereplő villamos energia és hőtermelési alternatívákat minden egyes szempont szerint, ötös skálán pontozták. A táblázatos formában megvalósított értékelési eljárás lehetőséget nyújtott arra, hogy minden alternatíva esetén a szempontok fontossága is összehasonlítható legyen. Ezzel az alternatívák és a szempontok között kölcsönös értékelés valósult meg. A táblázat kitöltése csak olyan alternatívák esetén volt javasolt, mellyel kapcsolatban a válaszadónak személyes tapasztalata vagy biztos ismerete volt, így garantálva az átgondolt értékeléseket. Természetesen, az egyénileg kiválasztható alternatívák fontos többlet információt hordoztak, azonban a matematikai kiértékelést megnehezítette az alternatívák változó száma. További problémát jelentett, hogy a matematikai kiértékelés legalább három alternatíva pontozását igényelte, így az egy vagy két értékelést tartalmazó kérdőívek feldolgozására nem került sor, mellyel a minták egy csekély részét elvesztettük. A szempontok szerinti alternatíva pontokat mint vektorkomponenseket tekintve, az összetett szempontok vektorait az alszempontok vektorainak lineáris kombinációjával határoztam meg. A munkám további részében a lineáris kombinációk teljes mintájának geometriai középpel aggregált értékével dolgoztam. Számításaim alapján meghatározható egy rangsor arra vonatkozólag, hogy az összetett szempontok definiálásában az alszempontok mennyire fontos szerepet töltenek be. (8. táblázat) A számítások alapján kirajzolódó alszempont halmazok szépen lefedik a nehezen definiálható fenntartható vagy korszerű fogalmakat, mindezt úgy, hogy az 1000 minta aggregált eredményénél komoly simító hatás érvényesül. A kiemelt alszempont halmaz nagyfokú hasonlóságot mutat a két szektorban, csupán a súlypontok rendeződtek át a fontossági rangsorban. Korábban említésre került, hogy bizonyos tömör és jól értelmezhető összetett szempontokat főszempontokként emeltünk ki (gazdaságos, biztonságos, környezetbarát, környezetbe illeszkedik és kényelmes, illetve a villamosenergia-termelés esetén megbízható) azzal a céllal, hogy az egymás közötti viszonyukat páros összehasonlítással feltérképezzük.

8. táblázat Az összetett szempontokhoz rendelt alszempontok rangsora [0; 100] skálán,

K_i küszöbszámig

Fenntartható fogalma a fűtési szektorban									
Az energiahordozó kimeríthetetlen	Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti	Levegőszennyezést nem okoz	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Hazai energiahordozó	Klímaváltozáshoz nem járul hozzá	Zavaró hatásokat nem okoz (zaj; szag)	Kevés hulladékot termel		
100	92	78	62	59	55	52	43		
Fenntartható fogalma a villamosenergia-termelési szektorban									
A talajt és a vizet nem szennyezi	Nem eredményez veszélyes hulladékot	Az energiahordozó hosszú távon biztosított	Az energiahordozó sok országból beszerezhető	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Levegőszennyezést nem okoz	Klímaváltozáshoz nem járul hozzá			
100	51	46	46	42	39	36			
Korszerű fogalma a fűtési szektorban									
Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Fogyasztás a alacsony	Fizikai munkát nem igényel	Zavaró hatásokat nem okoz (zaj; szag)	Tűz- és robbanásveszély nem áll fenn vele kapcsolatban	Kevés hulladékot termel	Karbantartási igénye kicsi	Levegőszennyezést nem okoz	Az energiahordozó kimeríthetetlen	Klímaváltozáshoz nem járul hozzá
100	92	88	85	80	73	70	70	65	63
Korszerű fogalma a villamosenergia-termelési szektorban									
Balesetek kockázata csekély	Klímaváltozáshoz nem járul hozzá	Levegőszennyezést nem okoz	Hosszú az élettartam	Jól szabályozható termelés	Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti				
100	95	89	86	76			71		
Megbízható fogalma a fűtési szektorban						Hatékony fogalma a villamosenergia-termelési szektorban			
Független rendszerként önállóan üzemeltethető	Élettartama hosszú	Karbantartási igénye kicsi	Jól szabályozható az üzemelés	Az energiahordozó tárolható	Hosszú az élettartam	Az energiahordozó hosszú távon biztosított	Jól szabályozható termelés		
100	78	76	68	67	100	52	49		
Megújuló fogalma a villamosenergia-termelési szektorban									
Klímaváltozáshoz nem járul hozzá	Nem eredményez veszélyes hulladékot	Levegőszennyezést nem okoz	Az energiahordozó hosszú távon biztosított	A talajt és a vizet nem szennyezi	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti			
100	84	82	80	71	61	60			

Ennek fontos része volt az alszempont rendszerek összehasonlítása és annak megállapítása, hogy hierarchikus struktúráként modellezhetők-e. A három általánosan használt főszempontra

fókuszálva (9. táblázat) jól látható, hogy a kialakult definiáló alszemponthalmazok közel se diszjunktak, így esetünkben a hierarchikus modellek nem alkalmazhatóak.

9. táblázat Három főszemponthoz tartozó alszemponrendszer és ezek fontossági súlyai [0; 100] skálán a K_i küszöbszámig, a fűtési és a villamosenergia-termelési szektorra.

Gazdaságos fogalma a fűtési szektorban						
Fogyasztása alacsony	Élettartama hosszú	Energiahordozó ára alacsony	Az energiahordozó tárolható	Karbantartási igénye kicsi	Az energiahordozó kimeríthetetlen	Beruházási költség alacsony
100	82	81	70	66	66	18

Gazdaságos fogalma a villamosenergia-termelési szektorban			
Az energiahordozó hosszú távon biztosított	Élettartama hosszú	Energiahordozó ára alacsony	Beruházási költség alacsony
100	94	88	0

Biztonságos fogalma a fűtési szektorban						
Tűz- és robbanásveszély nem áll fenn vele kapcsolatban	Az energiahordozó kimeríthetetlen	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Élettartama hosszú	Zajhatással nem jár	Karbantartási igénye kicsi	Hazai energiahordozó
100	74	72	58	56	53	46

Biztonságos fogalma a villamosenergia-termelési szektorban					
A lehetséges balesetek csak kevés embert érintenek	Balesetek kockázata csekély	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Nem eredményez veszélyes hulladékot	Az energiahordozó hosszú távon biztosított	Természeti csapásoknak ellenáll
100	79	76	66	58	22

Környezetbarát fogalma a fűtési szektorban						
Levegő- szennyezést nem okoz	Klíma- változáshoz nem járul hozzá	Kevés hulladékot termel	Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti	Nem okoz kellemetlen szaghatásoka t	Az energiahordoz ó kimeríthetetlen	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre
100	78	73	67	64	58	53

Környezetbarát fogalma a villamosenergia-termelési szektorban					
Klíma- változáshoz nem járul hozzá	Levegő- szennyezést nem okoz	Nem eredményez veszélyes hulladékot	A talajt és a vizeket nem szennyezi	Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti
100	95	83	79	67	58

A szempontrendszer összefüggőségét elsősorban arra vezethetjük vissza, hogy a biztonságos főszempontnak sok nyelvben, így a magyarban is két vetülete van, egyfelől az ellátásbiztonság, ahol a gazdasági szempontokkal ér össze (élettartama hosszú, karbantartási igénye kicsi), másfelől a környezetbarát fogalomhoz illeszkedő környezetbiztonság értelmezés (hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre, nem eredményez veszélyes hulladékot). Mindhárom főszemponthoz kapcsolódik „az energiahordozó kimeríthetetlen” alszempont, melynek gazdasági, környezeti és ellátásbiztonság szemszöge is létezik. Érdekes talán szót ejtenünk két alszempontról, melyek messze elmaradtak a feltételezett alszempont rangsorban. Egyik a beruházási költség, mely kétségtelenül a gazdasági főszemponthoz tartozik, azonban a közvélemény teljesen mellőzi ezt a szempontot. Másik, hasonlóan, a természeti csapásoknak ellenáll fogalma, mely biztosan a biztonságos főszempont része, azonban jelentéktelen súlyt kapott. A táblázatokban mindkét szempontot feltüntettem, hiszen fontos látni, hogy a közvélemény vélemény alkotásában ezen szempontok hol foglalnak helyet. Két főszempont szektoronként eltérő volt, így külön táblázatban teszek róluk említést (10. táblázat). A közvetlen tapasztalat háttérű fűtési szektor esetén a kényelmes főszempont fogalma két helyen is kapcsolódik a környezetbarát fogalomkörhöz, míg az ipari méretű villamosenergia-termelés esetén a megbízhatóság erősen kapcsolódik a biztonság fogalmához, amit ismét az ellátásbiztonság jelentéstartalmára vezethetünk vissza.

10. táblázat Az eltérő főszempontokhoz rendelt alszempontok rangsora [0; 100] skálán,

K_i küszöbszámig

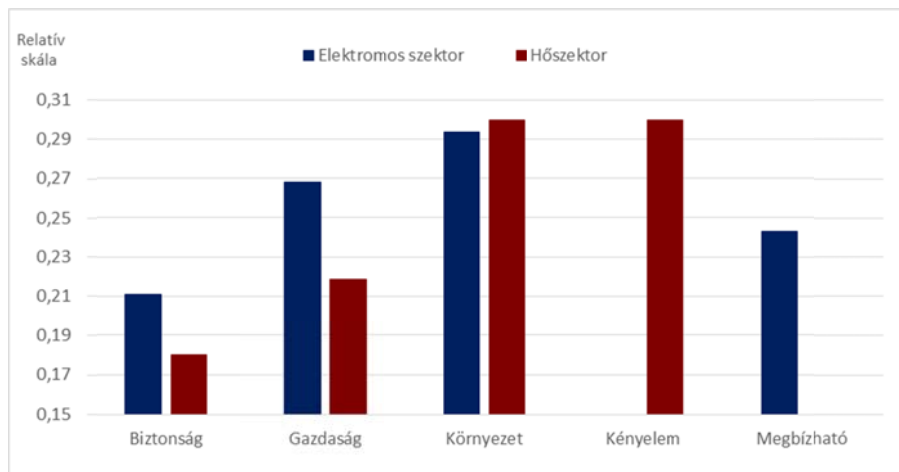
Kényelmes fogalma a fűtési szektorban			Megbízható fogalma a villamosenergia-termelési szektorban			
Fizikai munkát nem igényel	Kevés hulladékot termel	Zavaró hatásokat nem okoz (zaj; szag)	Jól szabályozható termelés	Nem eredményez veszélyes hulladékot	Hosszú az élettartam	Természeti csapásoknak ellenáll
100	70	62	100	57	45	43

Meg kell említenünk ugyanakkor a vázolt módszer korlátait is, a főszempontok közé emelt tájképrombolás fogalma esetén nehezen értelmezhető, bizonytalan eredményeket kaptunk, melyek arra utalnak hogy a teljes szempontrendszerben a tájképrombolás inkább izolált szempontként működik és nem értelmezhető a többi alszemponttal. A további számításainkat ezek alapján négy főszemponttal valósítottuk meg.

4.5. Értékelési szempontsúlyok meghatározása többcélú optimalizáláshoz

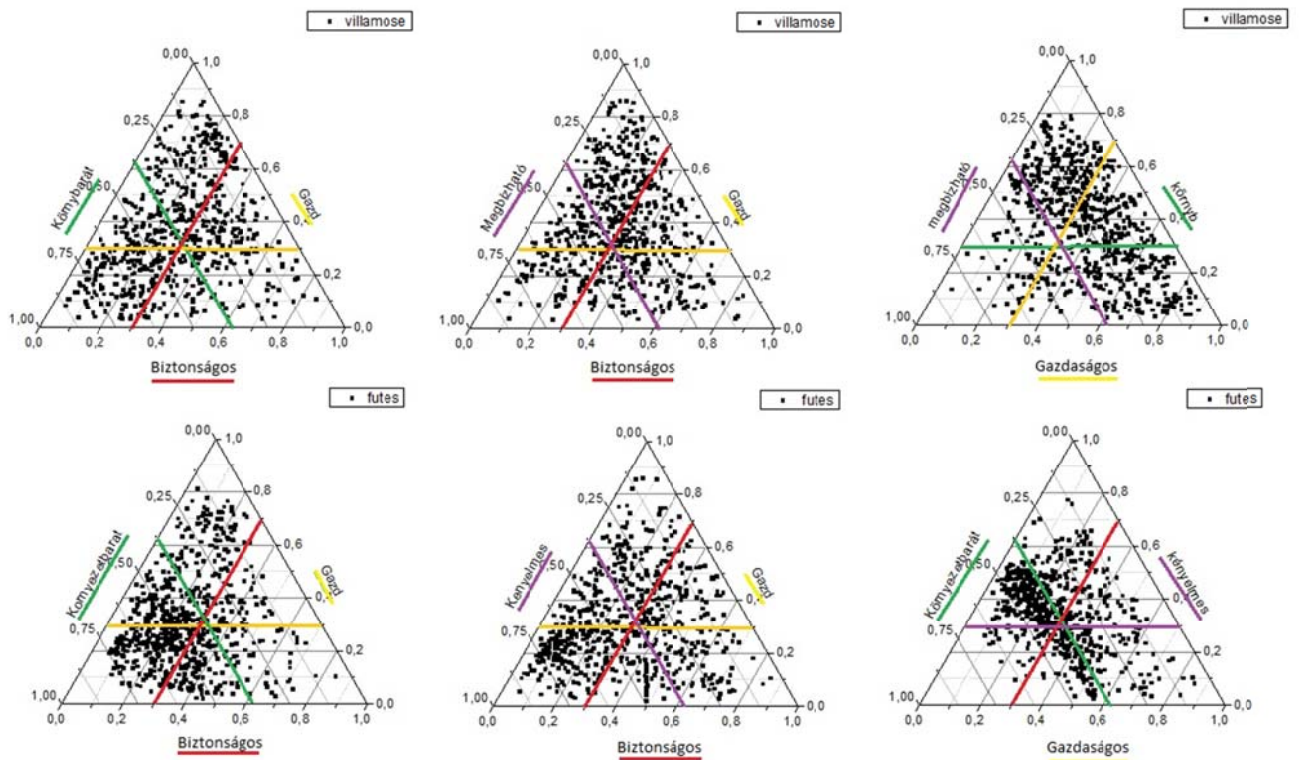
Tanulmányomban, az energetika területéről bemutatott döntéstámogatási problémáknál szinte kivétel nélkül többcélú programozási feladat megoldására került sor. A döntési eljárásba bevont szempontok súlyozásos módszerrel kerültek összevonásra a célfüggvényben. A korábbi fejezetben a szempontok strukturálására és értelmezésére láttunk példát. Ebben a szakaszban a szempontsúlyok meghatározása kerül előtérbe a korábban említett társadalomtudományi felmérés kvantitatív részének adataira támaszkodva. A kutatás ezen részében két módszert ötvöztünk, egyfelől az összetett szempontok fontossági súlyait páros összehasonlítással határoztuk meg, míg a teljes szempontrendszer belső viszonyainak feltárásához egy kiegészítő, gondosan kiválasztott alternatívahalmazt (energiatermelési alternatívák halmazát) alkalmaztunk, melyek elemei összetett és egyszerű szempontok alapján is direkt módon értékelhetők. A kiválasztott alternatívák esetén elsősorban az alkalmazás és az energiahordozók kerültek kihangsúlyozásra, technológia és méretlépcső specifikáció nélkül. Az alternatívák bevonása a szempontok értékelésébe azzal indokolható, hogy gyakran az egymástól távol eső absztrakt fogalmak páros összehasonlítása jóval nehezebb értelmezhető, mint az alternatívák szempontok szerinti direkt értékelése. Az alternatívák kérdőívbe történő bevonása tehát elsősorban a könnyebb válaszadást szolgálta, azonban

fontos szerepet játszottak egyfelől az előző fejezetben tárgyalt szempontok hierarchiájának föltérképezésében, másfelől az alszempontok fontossági értékelésében, ahol a főszempontok rangsorát az alternatívák halmaza közvetíti az alszempontok irányába. A tömören vázolt rangsorolási módszer alkalmazására azért került sor, mert a szempontrendszer alszempont-halmazai nem diszjunktak, így az alszempontok egységes értékelésére a hierarchikus modellek nem alkalmasak. A fontossági értékelés hierarchikus megközelítése helyett ezért a lényegesen bonyolultabb ANP hálózati modellt alkalmaztam. Az ANP módszer alkalmazásához az összetett szempontok és benne a főszempontok rangsora páros összehasonlítással került meghatározásra, azonban a kérdőív egyszerűsítése végett többszörösen összefüggő de hiányos formában. A kisszámú főszempont miatt eltekintettem a BWM módszer alkalmazásától. A hiányos páros összehasonlítási mátrixok adatainak feldolgozása sajátvektor módszerrel történt, inkonzisztencia ellenőrzéssel kiegészítve. A felmérés egészéről kijelenthető, hogy az értékelésbe bevont szempontok jól kezelhetőnek bizonyultak, az alternatívák szempontok szerinti értékelésnél és a páros összehasonlításnál sem lépett fel szisztematikus adathiány. A válaszokban a nyolc alternatíva harmada szerepelt átlagosan. Az értékelések alapján megállapítható, hogy a megújuló energiaforrások társadalmi ismerete (napenergia 42%; szélenergia 26%) elmarad a klasszikus energiahordozók, mint például a földgáz és az atomenergia mellett (földgáz 68%; atomenergia 49%). Mielőtt az ANP módszerre kiszámolt alternatíva és szempont súlyok eredményeit bemutatnám, érdemes kitérni a hiányos páros összehasonlítási mátrix sajátérték módszerrel kiszámolt normált szempontsúlyaira, hiszen ezek alkotják a ANP módszer kiindulópontját. A főszempontsúlyok aggregált értékei a fűtési és villamosenergia-termelési szektorban természetesen eltérő rangsort eredményeztek. (22. ábra)



22. ábra Főszempontsúlyok aggregált értékei egyre normált összege (A hiányzó értékek az adott szektorban nem szereplő szempontot jelentenek.)

A fűtésnél, mint egyéni felhasználásnál nem elítélhető módon a kényelem a legfontosabb főszempont, igaz mellette szinte azonos súllyal a környezetbarát szempont szerepel a rangsorban. A gazdasági főszempont fontossági súlya azonban meglepetést okozott azzal, hogy az egyéni felhasználás esetén jelentősen elmaradt az élmezőnytől. Érdekes módon az ipari méretű energiatermelésnél a gazdaságosság már közvetlenül a környezetbarát szempont után a második helyet foglalja el. A biztonságosság mindkét esetben a legkevésbé kiemelt főszempont. Természetesen az egyéni válaszok változatosságát vagy különböző csoportok ellentétes véleményeit az átlagszámítás kisimítja, azonban az alapvető tendenciák így is megmutatkoznak. Az aggregált főszempont súlyok rangsora széleskörűen felhasználhatók és fontos szerepet játszanak a munkám további szakaszában, azonban lényeges tudni, hogy az egyéni válaszok szintjén a főszempont súlyok szinte homogén módon oszlanak el a négy főszempont között, csupán néhány kitüntetett irány fedezhető fel közöttük. (23. ábra)



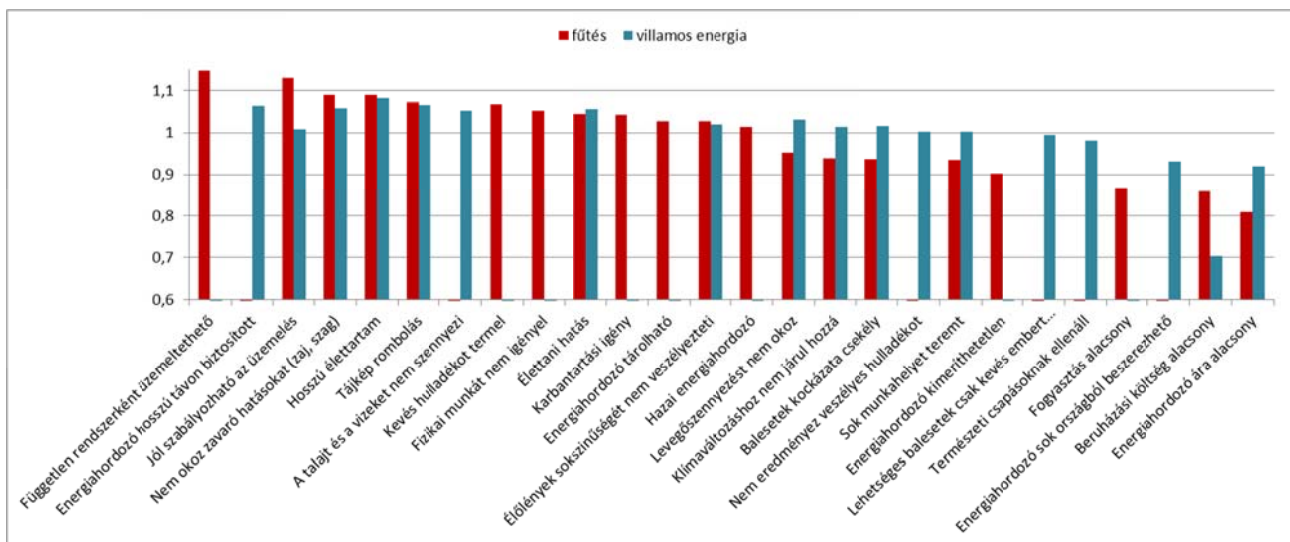
23. ábra Az egyéni főszempont súlyok eloszlása háromszög diagramon ábrázolva

A kitétetett irányok, melyek megegyeznek az aggregált eredmények kiemelt szempontsúlyaival, így a fűtésnél a környezetbarát és kényelmes vannak fölül, míg a villamos szektornál a megbízható és biztonságos vannak alul reprezentálva. A kérdőíves felmérés szocio-demográfiai adatai lehetőséget teremtettek annak a megvizsgálására is, hogy kimutatható-e olyan társadalmi réteg, melynél valamely főszempont hangsúlyosabban van jelen. A társadalmi klaszterek kialakításához szükséges variancia vizsgálat az ún. ANOVA (ANalysis Of VAriance) modellel történt. Az eredmények alapján az egyénekenként kiértékelt főszempontok az előzetes várakozásokkal ellentétesen az alapvető demográfiai változókkal (iskolai végzettség, jövedelem, kor) sehol sem mutattak statisztikailag elfogadható összefüggéseket. Ezek az eredmények egyfelől megnyugtatóak, hiszen egy homogén társadalom képét mutatják, ugyanakkor bizonyos elemek szinte zavarba ejtőek. Ezek közül talán a legérdekesebb az, hogy a jövedelem a gazdasági főszempont értékelésénél nem volt befolyásoló tényező. Hasonlóan homogén véleményalkotást a lakhatási körülmények alapján történő elemzés esetén már nem figyelhetünk meg. A lakóhely típusára fókuszálva

elmondható, hogy a magas biztonság és a környezetbarát fűszempont súlyok elsősorban a városokban élőket; a gazdaságosság, az alacsony ár és a kényelem pedig kifejezetten a fővárosiakat jellemezte. Épülettípológiai csoportokat figyelembe véve azt tapasztaltuk, hogy a kényelem szempontja a zöldövezeti társasházakban, a városi bérházakban és a lakótelepi lakásokban élőkénél volt átlagot meghaladó mértékben szempont. A gazdaságosságot a többlakásos társasházakban, míg a környezetbarát jelleget a városi bérházakban élők tartották szem előtt. A biztonság a villanyfűtést használók esetében volt kiemelt szempont. A villamos energiával kapcsolatosan a biztonságosság fűszempont a városokban és a komfort nélküli lakásban élőkénél volt kiemelkedően fontos.

Lakókörnyezeti különbségeket tanulmányozva megállapítható, hogy a gazdaságosságot a fővárosiak, a környezetbarát jelleget pedig a városokban és a lakótelepi lakásokban élők hangsúlyozták ki. A megbízhatóságot a megyei jogú városok lakói és a megújuló energiaforrást használók tartották fontosabbnak.

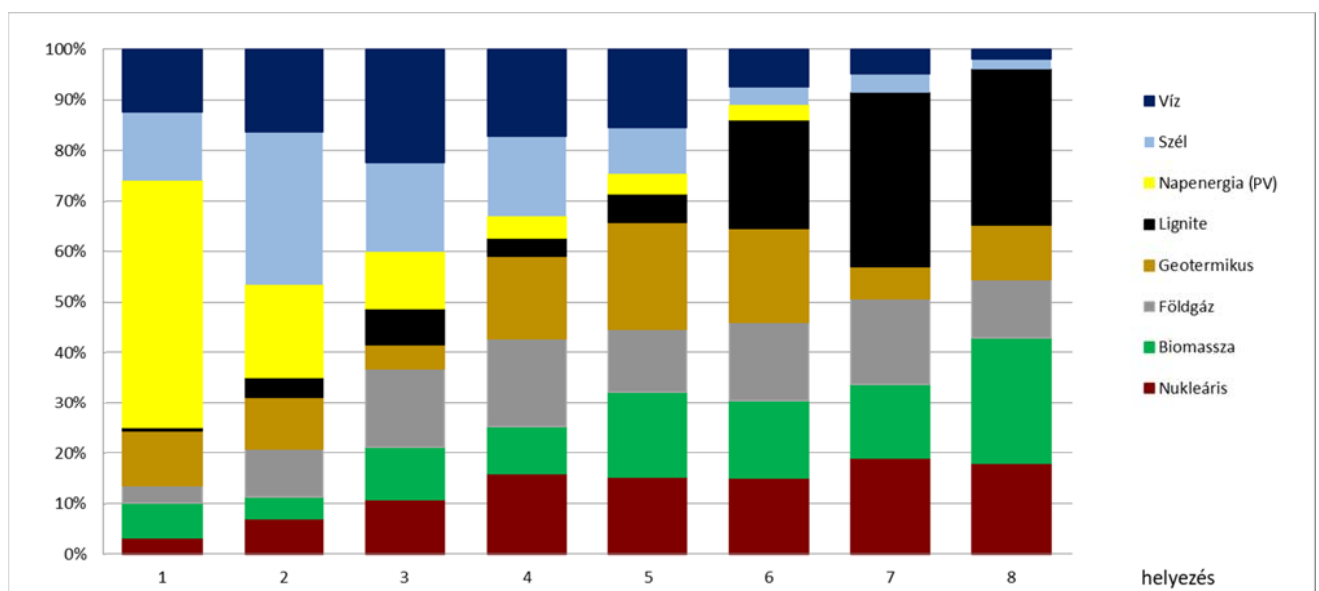
A kiemelt fűszempontok értékelése és a társadalmi klaszterek elemzése mellett tanulmányom fontos célkitűzése volt az alszempontok rangsorolása is. Mivel az alszempontok értékelése az ANP módszer alkalmazásával történt, ahol a kiindulási pontot a fűszempontok rangsora adja, a legfontosabb jellegzetességek visszaköszönnek az aggregált alszempont súlyok esetén is. (24. ábra)



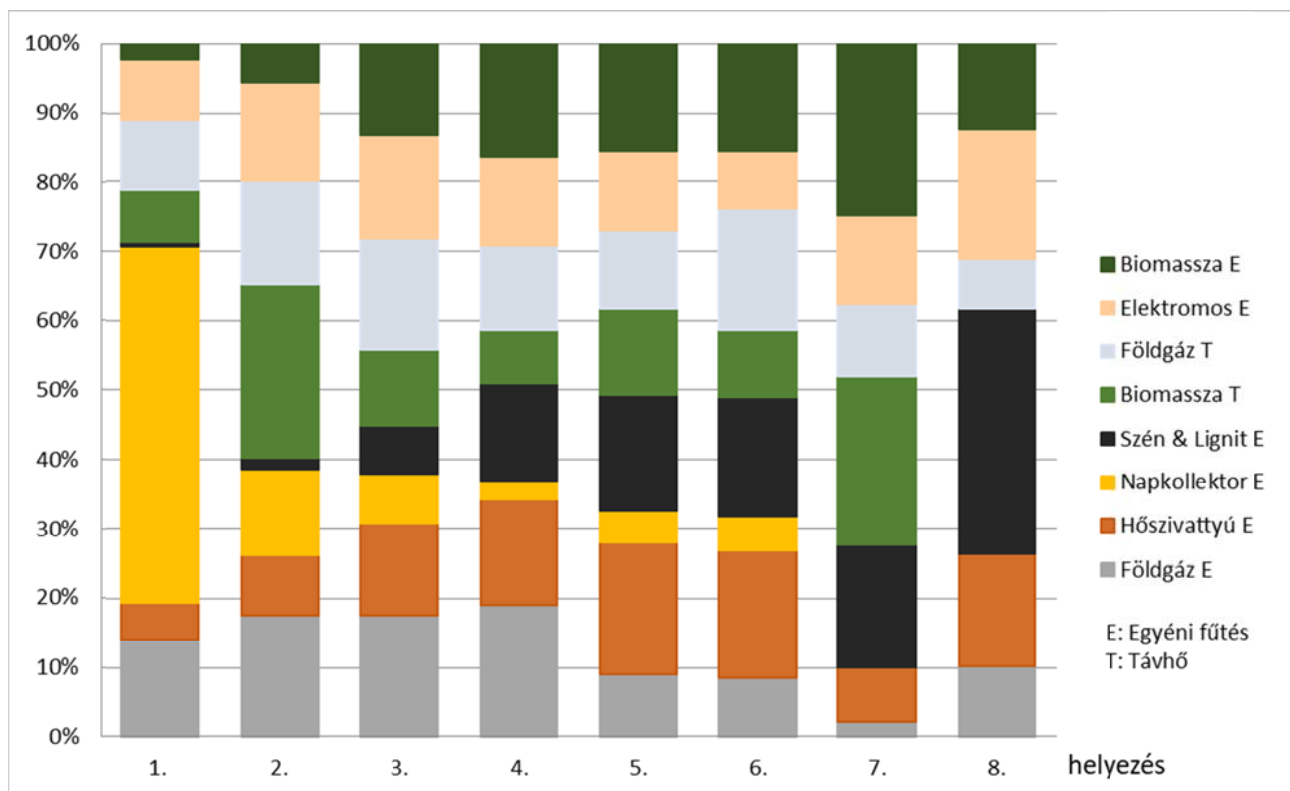
24. ábra Átlagos alszempont súlyok rangsora a fűtési és villamosenergia-szektorban (A hiányzó értékek az adott szektorban nem szereplő szempontot jelentenek.)

A fűtés esetén egyértelműen az üzemeltetés rugalmasságához kapcsolódó alszempontok szerepelnek az élen, míg a középmezőnyben a környezeti, illetve kényelmi szempontok dominálnak. A gazdasági szempontok szinte maradéktalanul a rangsor végén foglalnak helyet. Amennyiben az előző fejezet eredményeire támaszkodva arra a kérdésre keresnénk választ, hogy melyik összetett szempont összegzi legügyesebben az élen szereplő alszempontokat és így a legfontosabb döntési faktor a fűtési szektorban, akkor a megbízhatóság fogalmát kell megemlítenünk, mely az első négy alszempont közül hármat tartalmaz, így a kényelmi főszempontnál is kedvezőbb a pozíciója. A villamosenergia-termelés esetén az alszempont mezőny sokkal inkább kiegyenlített. A hatékony mellett a korszerű is fontos kritériummá emelkedik az értékelésben a kifejezetten pozitív megítélésű, megújuló összetett szemponttal együtt. Ugyanakkor mindhárom összetett szempont megelőzi az értékelésben a környezetbarát főszempontot. Az alszempontok rangsorát, hasonlóan a fűtési szektorhoz, a gazdasági szempontok zárják, melyeket a biztonságos üzemeltetés szempontjai előznek meg.

A fő és alszempontok értékelése után az ANP módszer közvetítő halmazának, az alternatíváknak a rangsorolása maradt még hátra. A kitöltött kérdőívekben ugyan az alternatívák minden szempont szerint értékelésre kerültek, azonban komoly kihívás ezeket összevonni, hiszen a főszempontok nem diszjunktak. A rangsorolás ismét az ANP módszer alkalmazásával történt. Az eredményekből kialakult éremtáblázat összhangban van a fókuszcsoportos vizsgálat eredményeivel (25. és 26. ábra).



25. ábra Az elektromos szektor alternatíváinak éremtáblázata



26. ábra A hő szektor alternatíváinak éremtáblázata

Az eredmények jól tükrözik a megújuló energiaforrások kiemelt szerepét, kihangsúlyozva a napenergia fontosságát, valamint a szén és lignittüzelés nagyfokú elutasíthatóságát. A többi energiahordozó megítélése kevésbé egységes, így a főszeponctokhoz hasonlóan fontos lehet az esetleges társadalmi klaszterek felkutatása. A társadalmi csoportok kialakítása az alternatíva szimpátia és alapvető demográfiai változók (iskolai végzettség, jövedelem, kor) segítségével már néhány egyszerű eredményt adott. Ezek az eredmények azzal magyarázhatóak, hogy az alternatívákkal kapcsolatos tapasztalat és ismeret sokkal élesebb kontúrokat rajzol ki a társadalomban, mint a plasztikusabban értelmezhető főszeponctok, ahol csoportosításunk nem járt sikerrel. Az öt jövedelmi kategória figyelembevételével megállapítható, hogy a villamosenergia-termelésnél a biomassza értékelése két szélsőséges csoport, a legmagasabb és a legalacsonyabb keresetűek esetén kedvezőbb, míg az átlag közeli jövedelműeknél alulértékelt. Az atomenergia megítélése nagyon hasonlóan alakult, mivel a magasabb jövedelmi kategóriába eső válaszadók itt is kedvezőbben, az átlagos jövedelműek alacsonyabb súllyal értékelték. Ezzel szemben a vízenergia megítélése teljesen ellentétes struktúrájú, hiszen a legmagasabb jövedelműek le-, míg az átlagos és annál alacsonyabb fizetéssel rendelkezők felértékelték ezt az alternatívát. Meg kell azonban jegyezni, hogy az

átlagos jövedelműek a vízenergia mellett a lignit alapú energiatermelést is a többi jövedelmi kategóriánál kedvezőbben értékelték. A fűtés esetén a földgázzal üzemeltetett központi fűtést magasabb súllyal említették az átlagos jövedelműek, alacsonyabbal a szerényebb jövedelemmel rendelkezők. A napenergiával történő fűtésrészegítés nagyobb súllyal jelent meg az átlag alatti, valamint a legmagasabb jövedelműek értékelésében és kisebbel az átlagos jövedelműek esetén.

Természetesen az eredmények értelmezésének megkerülhetetlen része a települési vagy lakhatási adatok alapján kialakított társadalmi csoportok, alternatíva szimpátia szerinti felkutatása. Ezek alapján megállapítható, hogy a fa és széntüzelést kedvezőbben értékelők között átlagon felüli arányban szerepeltek a községekben élők, míg a gázzal előállított távhő és elektromos fűtés pedig jellemzően a fővárosban élők között kiemelkedő jelentőségű.

A lakás vagy ház típusát figyelembe véve az tapasztalható, hogy a fatüzelés a családi házakban és a zöldövezeti többlakásos sorházakban az átlagot meghaladva támogatott. A széntüzelést elsősorban a családi házakban élők értékelik pozitívabban. A napenergia alapú fűtésrészegítés a társasházakban élőkénél fontosabb az átlagosnál, a távhő értékelése pedig a társasházakban és a lakótelepeken élők között kiemelkedő. Az elektromos fűtés elfogadottsága elsősorban mint fűtés kiegészítés a társasházakban magas. Talán nem kell külön kihangsúlyoznom, hogy a felsorolt összefüggések jelentős része trivialis, melyek elsősorban az épülettípus és a preferált fűtési alternatíva esetén szembeötlő.

A kézenfekvő kapcsolatok közé sorolhatnánk az iskolai végzettséghez köthető egyetlen összefüggést, mely alapján a fa kályhával való tüzelés súlya jelentősen magasabb az alapfokú és szakmunkás végzettségűek körében, míg jóval alacsonyabb a legalább érettségivel rendelkezők között.

A felsorolt trivialisok, azért fontosak és megnyugtatóak, mert mint kötelezően elvárt eredmények jól szemléltetik a felépített modell erejét. Ki kell hangsúlyoznunk, hogy az alternatíva rangsor a válaszadók által nem direkt módon lett értékelve, hanem az ANP módszer eredményeként keletkeztek, ahova szempontok kölcsönös összehasonlításával, az alternatívák szempontok szerinti értékelésével jutottunk. Ezek alapján a felsorolt, kézenfekvő összefüggések a szempontokkal kapcsolatos eredményeinket is megerősítik. Ugyanakkor további vizsgálatok szükségességét is előre vetítik, hogy a nehezebben értelmezhető egyéni szempont súlyok vagy éppen a jövedelemhez kapcsolódó preferenciák is értelmezhetőek legyenek.

5. Összegzés

Disszertációm kiindulási pontja optimális forráskiosztás meghatározása volt energetikai problémákban, melyek stratégiai döntések megalapozását teszik lehetővé. Az első három fejezetben szekszárdi, budapesti és országos beruházási projekteket mutattam be, melyek különböző megközelítésből eredményeztek disztribúciós feladatokat. A tárgyalásra kerülő problémáknál olyan megoldási eljárásokat mutattam be, melyek az optimális eredmények meghatározásán túl az energetikai értelmezést is elősegítik. Mivel a döntéstámogatás során tágabb szemponthalmaz figyelembevétele szükséges, így a bemutatott feladatokban többcélú optimalizálást alkalmaztam, szempontsúlyozásos technikával. A szempontsúlyozás során nehéz objektív eredményeket kialakítani, ezért elengedhetetlen az optimális megoldások teljes érzékenységvizsgálata. Hasonló problémát jelenthet a disztribúciós feladat egyéb paramétereinek bizonytalansága, melynek tárgyalására mint további kutatási területre tekintek. Jelen munkámban a paraméter intervallumok problémáját egy piactelítődési modellel kerültem ki, mely konvex kvadratikus problémát eredményezett. A piac telítődés folyamatának leírása egyszerű lineáris függvényekkel történt, azonban ennek a területnek a részletes feltérképezése is a közeljövő feladata lehet. A kidolgozott módszertan természetesen egyéb dinamikusan változó költséggel rendelkező folyamat modellezésére is alkalmas, így például tanulási görbék figyelembevételére, ami remek lehetőséget teremt a hosszútávú forgatókönyvek összeállítására. Az ismertetett matematikai eljárások ugyanakkor messze túlmutatnak az energetikai alkalmazásokon és szinte minden disztribúciós probléma esetén felhasználhatók.

Munkám második részében a döntési szempontok kiválasztására és értelmezésére dolgoztam ki módszertant, amit egy társadalomtudományi felmérés adatainak feldolgozásán keresztül mutattam be. A döntési szempontok értelmezése lehetőséget teremt a szempontrendszer strukturálására és a szempontsúlyok kialakítására. A társadalomtudományi felmérés alapján kialakult szempontrendszer nem alkotott hierarchikus struktúrát, így a szempontsúlyok meghatározására az ANP modellnek a problémánkhoz illesztett változatát alkalmaztam. Az általam kidolgozott eljárással az összehasonlítások száma jelentősen csökkenthető, és az egymással nehezen összemérhető, elvont fogalmak fontossági rangsora is kialakítható. A rangsorok meghatározására kidolgozott módszer azonban nem korlátozódik csupán az energetika területére, hiszen olyan területeken általánosan alkalmazható, ahol a szempontokhoz egy jól értékelhető alternatíva halmaz is kapcsolódik.

6. Új tudományos eredmények

Tézisek

1. Energetikai problémákhoz kapcsolódó optimális forráskiosztás meghatározását valósítottam meg disztribúciós feladatként és annak hátizsák feladattá alakításához módszertant dolgoztam ki. Az új módszertan kialakításának jelentősége abban áll, hogy az energetikában általánosan használt „merit order” megoldással analóg megközelítést eredményez. A kidolgozott modell lehetőséget teremt a többcélú optimalizálás telepítési és üzemeltetési szakaszaihoz kapcsolható szempontok figyelembevételére. A módszer alkalmazásaként Szekszárd városára kiszámolt optimális fűtési portfólió esetén, az értékelési szempontok, mint költségek monetarizálva kerültek összevonásra a célfüggvény együtthatókban [32].
2. Módszertant dolgoztam ki disztribúciós feladat többcélú optimalizálásának érzékenységvizsgálatához hátizsák feladat megközelítés felhasználásával. A kifejlesztett eljárást a budapesti hőszektor optimális forráskiosztásának szempontsúlyokra vonatkozó parciális érzékenységvizsgálatán keresztül mutattam be. A parciális érzékenységvizsgálat megkönnyíti az egységszimplex élei mentén az eredmények szemléltetését, emellett többlépcsős alkalmazásával tetszőleges belsőpontra kiterjeszhető. Az alkalmazás során előállt eredmények rámutatnak az értékelési szempontok között fennálló fontossági kompromisszumok kiemelt szerepére [35].
3. Disztribúciós feladatot dolgoztam ki az országos megújuló energiaforrások optimális felhasználásához, melyben a piac telítettségét a korlátozott erőforrásokon értelmezett lineáris költségfüggvényekkel vettem figyelembe. A költség bizonytalanságok felhasználásával kialakított modell matematikai felírása egy disztribúciós probléma konvex kvadratikus esetét eredményezte. Az előállt NLP feladat finomabb átmenetet biztosít a megoldások között, mint a klasszikus disztribúciós probléma LP felírása, ahol minden alternatíva értéke kvantált, vagyis a nulla érték mellett a potenciál vagy egyéb korlátok maximumát vehetik fel [36].

4. Módszertant dolgoztam ki a döntéstámogatási problémák összetett értékelési szempontjainak értelmezésére, mely lehetőséget teremt a szempontrendszer hierarchiájának feltérképezésére is. A kialakított metodológiát egy társadalomtudományi felmérés országos adatsorának kiértékelésével teszteltem, több nehezen definiálható fogalom értelmezését valósítottam meg, továbbá bemutattam, hogy a főszempontokhoz rendelhető szemponthalmazok nem diszjunktak, így a hierarchikus rangsorolási technikák nem alkalmazhatók [40].

5. Többcélú optimalizálás értékelési szempontsúlyainak meghatározását valósítottam meg egy energetikai témához kapcsolódó társadalomtudományi felmérés eredményeinek felhasználásával. Az egységes súlyozás kialakításához az Analytic Network Process (ANP) módszernek a jelen problémához igazított formáját alkalmaztam. A kidolgozott módszertanban ötvöztem a páros összehasonlítási értékelés hiányos mátrixra vonatkozó esetét az energiafejlesztési alternatívák direkt pontozásával, a számítások eredményeként a teljes szempontrendszer rangsorát kaptam [40].

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, Fülöp Jánosnak, hogy szakmai segítségével hosszú évek át támogatta munkámat és disszertációm összeállításánál fontos javaslatokkal látott el. Ugyancsak köszönöm Galántai Aurél és Szeidl László professzor urak gyakorlatias tanácsait, mellyel nem egy holtpontra lendítették át munkámat. Külön köszönöm Tar József professzor úr segítőkész támogatását a fokozatszerzési eljárás megszervezésében és természetesen köszönöm Bácskai Zsuzsanna készséges, és kedves ügyintézését.

Köszönöm munkahelyem, az Energiatudományi Kutatóközpont támogatását, mellyel a teljes fokozatszerzési folyamatot elősegítette. Kiemelten szeretném megköszönni Török Szabina átgondolt előkészítési munkáját, Oláhné Groma Veronika fáradságos számítási és aprólékos javítási munkáit és Osán János szakmai tanácsait.

Végül köszönöm családom támogatását.

Irodalmi hivatkozások listája

- [1] B. R. Keeble, The Brundtland report: Our Common Future, pp. 291–294, 1987.
- [2] International Atomic Energy Agency, United Nations Department of Economic and Social Affairs, International Energy Agency, Eurostat and European Environment Agency, Energy Indicators for Sustainable Development, IAEA, Vienna, Austria, 2005.
- [3] Energy Technology Systems Analysis Programme, Documentation for the TIMES Model, ETSAP, 2016.
- [4] International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide, IAEA, Vienna, Austria, 2016.
- [5] R. E. Rosenthal, GAMS - A User's Guide, GAMS Development Corporation, Washington, USA, 2007.
- [6] R. G. Bland, New Finite Pivoting Rules for the Simplex Method, Mathematics of Operations Research, Vol. 2, No. 2, pp. 103-107, 1977.
- [7] V. Klee, G. Minty, How good is the Simplex algorithm?, in: O. Shisha, ed., Inequalities III, Academic Press, New York, pp. 159-175, 1972.
- [8] C. Roos, An exponential example for Terlaky's pivoting rule for the criss-cross simplex method, Mathematical Programming volume 46, pp. 79–84, 1990.
- [9] K. Fukuda, M. Namiki, On extremal behaviors of Murty's least index method, Mathematical Programming volume 64, pp. 365–370, 1994.
- [10] P. Gács, L. Lovász, Khachian's algorithm for linear programming, Technical report STAN-CS-79_750, Computer Science Department, Stanford University, 1979.
- [11] N. Karmarkar, A new polynomial-time algorithm for linear programming, Combinatorica, 4 (4), 373–395, doi:10.1007/BF02579150, 1984.
- [12] G. B. Dantzig, Linear Programming and Extension, Princeton University Press, August 1963.
- [13] N. V. Reinfeld, W. R. Vogel, Mathematical Programming, New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1958.
- [14] P. Wolfe, The Simplex Method for Quadratic Programming, Econometrica, Vol. 27, No. 3, pp. 382-398, 1959.

- [15] H. W. Kuhn, A. W. Tucker, Nonlinear Programming, Proceedings of the Second Berkeley Symposium on mathematical Statistics and Probability, pp. 481-492, 1950.
- [16] R. E. Steuer, Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, pp. 532-546, 1986.
- [17] T. Rapesák, Többszemontú döntési problémák; 2003.
- [18] D. Norman, H. Olaf, An Experimental Application of the Delphi Method to the use of experts, Management Science, No. 9, pp. 458–467, 1963.
- [19] T. L. Saaty, The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [20] P. Jong, A statistical approach to Saaty's scaling method for priorities, Journal of Mathematical Psychology, No. 28, pp. 467-478, 1984.
- [21] W. W. Koczkodaj, A new definition of consistency of pairwise comparisons, Mathematical and computer modelling, No. 18, pp. 79-84, 1993.
- [22] A. T. W. Chu, R. E. Kalaba, K. Spingarn, A comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets, Journal of Optim. Theory Appl., No. 27, pp. 531-538, 1979.
- [23] G. Crawford, C. Williams, A note on the analysis of subjective judgment matrices, Journal of Mathematical Psychology, No. 29, pp. 387-405, 1985.
- [24] S. Bozóki, T. Rapesák, On Saaty's and Koczkodaj's inconsistencies of pairwise comparison matrices, Journal of Global Optimization, No. 42, pp. 157–175, 2008.
- [25] J. Rezaei, Best-worst multi-criteria decision-making method, Omega, No. 53, pp. 49–57, 2015.
- [26] S. Shiraishi, T. Obata, M. Daigo, Properties of a positive reciprocal matrix and their application to AHP, Journal of the Operations Research Society of Japan, No. 41, pp. 404-414, 1998.
- [27] S. Shiraishi, T. Obata, On a maximization problem arising from a positive reciprocal matrix in AHP, Bulletin of Informatics and Cybernetics, No. 34, pp. 91-96, 2002.
- [28] S. Bozóki, J. Fülöp, L. Rónyai, On optimal completions of incomplete pairwise comparison matrices, Mathematical and Computer Modelling, No. 52, pp. 318–333, 2010.
- [29] T. L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation, McGraw-Hill, New York, USA, 1980.
- [30] T. L. Saaty, Decision Making with Independence and Feedback: The Analytic Network Process, RWS Publications, Pittsburgh, USA, 2001.
- [31] C. D. Meyer, Matrix Analysis and Applied Linear Algebra, SIAM, pp. 630-693, 2000.

- [32] E. Börcsök, Á. Gerse, J. Fülöp, Possibility of nuclear cogeneration development in the region of Paks, *Acta Polytechnica Hungarica*, No. 15, pp. 63-78, 2018.
- [33] B. Hartmann, E. Börcsök, V. O. Groma, J. Osán, A. Talamon, Sz. Török, M. Alföldy-Boruss, Multi-criteria revision of the Hungarian Renewable Energy Utilization Action Plan – Review of the aspect of economy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 80, pp. 1187-1200, 2017.
- [34] O. Mayer-Spohn, M. Besl, Documentation of the Life Cycle Inventory data in CASES, *CASES – Cost Assessment for Sustainable Energy Markets*, No. D6.1, 2007.
- [35] E. Börcsök, Á. Gerse, J. Fülöp, Applying Multiobjective Optimization for the Heat Supply in the Residential Sector in Budapest, 12th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SACI 2018, Timisoara, Romania, pp. 213-217, 2018.
- [36] E. Börcsök, Á. Gerse, J. Fülöp, Optimizing the use of renewable energy sources in the energy mix of Hungary, 17th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, SAMI 2019, Herl'any, Slovakia, 2019.
- [37] E. Börcsök, J. Osán, S. Bozóki, Sz. Török, Többszemontú döntési modell alkalmazása a hazai villamosenergia-termelési rendszer fejlesztésében, *Magyar Energetika*, No. 18/3, pp. 28-32, 2011.
- [38] E. Börcsök, J. Osán, Sz. Török, Környezeti externália és költség–haszon elemzés a hazai villamosenergia-termelésre, *MVM Közlemények*, No. 47, pp. 39-47, 2010.
- [39] S. Angilella, S. Corrente, S. Greco, R. Słowiński, Robust Ordinal Regression and Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis in multiple criteria hierarchy process for the Choquet integral preference model, *Omega*, No. 63, pp. 154–169, 2016.
- [40] E. Börcsök, Z. Ferencz, V. Groma, Á. Gerse, J. Fülöp, S. Bozóki, J. Osán, Sz. Török, Á. Horváth, Energy Supply Preferences as Multicriteria Decision Problems: Developing a System of Criteria from Survey Data, *ENERGIES*, No. 15, pp. 21-28, 2020.
- [41] S.Hirschberg, R.Dones, T. Heck, P. Burgherr, W. Schenler, C. Bauer, Strengths and Weaknesses of Current Energy Chains in a Sustainable Development Perspective, *atw* 51(7), pp. 447-457, 2006.
- [42] R. W. Saaty, *Decision Making in Complex Environments*, 2016. Available online: https://superdecisions.com/sd_resources/v28_man02.pdf, accessed 2020.
- [43] T. Orbán, Táv hőfejlesztési lehetőségek, jövőkép, BME ESzK 2017. Online elérhető: https://www.eszk.org/attachments/1347/ea/tavho_eloadas_eszk.pdf, 2017.
- [44] R. Porchia, Full cost estimates of the use of different energy sources, *CASES – Cost Assessment for Sustainable Energy Markets*, No. D6.1, 2007.

[45] Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Summary for Policymakers and Technical Summary, IPCC, 2012.

Ábrák és táblázatok jegyzéke

1. ábra A hátizsákok új kapacitásokkal történő feltöltésének összehasonlítása.
2. ábra A hátizsákok részleges feltöltése
3. ábra A három szempontoz tartozó súlyok által kifizített egységszimplex
4. ábra Három összetett szempont alszempontrendszer a hasonlósági együtthatók normált értékével (zárójelben a villamosenergia-termelés értékével)
5. ábra A társadalomtudományi felmérés ANP módszerre épülő szerkezete
6. ábra Az $(r + n + k + 1)$ méretű négyzetes B Super Matrix tartományai
7. ábra A B mátrix tartományai között lévő kapcsolatok gráf reprezentációja
8. ábra A B^2 mátrix tartományai között lévő kapcsolatok gráf reprezentációja
9. ábra A CO_2 kibocsátást figyelembe vevő és anélkül számolt határgörbe, melynél nagyobb hőigény esetén a beruházás megtérül (megtérülési idő: 40 év, diszkontálási állandó: 4%, CO_2 kvótaár: 5€/t)
10. ábra. Az egységes hőigényre vetített éves költség (140 m²; 10,6 kW), ahol a nukleáris távfűtés állandó költsége tartalmazza a 30km hosszú távvezeték kiépítését. (EF: Egyéni fűtés; TF: Távfűtés; CSH: családi ház; TH: társasház; ITH: ipari társasház)
11. ábra Maximumra normált hőfejlesztési és igényoldali profilok
12. ábra Családi házakhoz kapcsolódó hőtermelési portfóliók havi felbontásban. Csupán állandó és változó költséggel számolva (balra); a hozzáadódó széndioxid kvótaár figyelembevételével (jobbra), illetve környezeti hatások externális költségével kiegészítve (lent).
13. ábra Társasházakhoz kapcsolódó hőtermelési portfóliók havi felbontásban. Csupán állandó és változó költséggel számolva (balra); a hozzáadódó széndioxid kvótaár figyelembevételével (jobbra), illetve környezeti hatások externális költségével kiegészítve (lent).
14. ábra Az ipari társasházakhoz kapcsolódó hőtermelési portfóliók havi felbontásban. Csupán állandó és változó költséggel számolva (balra); a hozzáadódó széndioxid kvótaár figyelembevételével (jobbra), illetve környezeti hatások externális költségével kiegészítve (lent).
15. ábra A nettó jelenérték alakulása különböző széndioxid ár értékekkel az élettartam idejére
16. ábra. Monetarizált szempont értékekkel modellezett ideális hőportfólió
17. ábra. Budapest hőtermelési portfóliójának energiahordozók szerint aggregált értéke gazdasági és klímahatás változó szempontsúlyainak figyelembevételével.
18. ábra. Budapest hőtermelési portfóliójának energiahordozók szerint aggregált értéke fűtési típusonként, szempontsúlyok alkalmazásával a gazdasági és a környezeti hatások figyelembevételénél.

19. ábra. Budapest hőtermelési portfóliójának energiahordozók szerint aggregált értéke fűtési típusonként, szempontsúlyok alkalmazásával a környezeti és a klímahatások figyelembevételénél.

20. ábra A hazai megújuló energiaforrások optimális portfóliója tisztán gazdasági szempontok figyelembevételére esetén

21. ábra A hazai megújuló energiaforrások optimális portfóliója gazdasági, klimatikus, élettani és környezeti hatások figyelembevételére esetén

22. ábra Főszempontsúlyok aggregált értékei egyre normált összege (A hiányzó értékek az adott szektorban nem szereplő szempontot jelentenek.)

23. ábra Az egyéni főszempont súlyok eloszlása háromszög diagramon ábrázolva

24. ábra Átlagos alszempont súlyok rangsora a fűtési és villamosenergia-szektorban (A hiányzó értékek az adott szektorban nem szereplő szempontot jelentenek.)

25. ábra Az elektromos szektor alternatíváinak éremtáblázata

26. ábra A hő szektor alternatíváinak éremtáblázata

1. táblázat A disztribúciós feladat keresleti és kínálati pontjai az optimális fűtési portfólió kialakításához

2. táblázat Az alternatívák szempontok szerinti értékelése

3. táblázat. A hő és villamosenergia-igény épülettípológiai csoportok szerint.

4. táblázat. A megújuló energiahordozók fenntartható potenciáljának országos értékei, továbbá a technológiától és méretlépcsőtől elvonatkoztatott fajlagos költségek minimum és maximum értékei.

5. táblázat. Fajlagos széndioxid kibocsátás, valamint a környezeti és élettani hatás számszerűsített értéke

6. táblázat Fókuszcsoportos beszélgetések során megemlített fogalmak, szempontok energiatermelési-alternatívák jelentéstartalom alapján történő csoportosítása

7. táblázat Fókuszcsoportos beszélgetések során megemlített fogalmak, szempontok tematikus csoportosítása.

8. táblázat Az összetett szempontokhoz rendelt alszempontok rangsora $[0; 100]$ skálán, K_i küszöbszámig

9. táblázat Három főszempontoz tartozó alszempontrendszer és ezek fontossági súlyai $[0; 100]$ skálán a K_i küszöbszámig, a fűtési és a villamosenergia-termelési szektorra.

10. táblázat Az eltérő főszempontokhoz rendelt alszempontok rangsora $[0; 100]$ skálán, K_i küszöbszámig

Rövidítések jegyzéke

AHP Analytic Hierarchy Proces

ANOVA ANalysis Of VAriance

ANP Analytic Network Process

BWM Best-Worst Method

CSH családi ház

EF Egyéni fűtés

GAMS General Algebraic Modeling System

ITH Ipari társasház

LCOE Average lifetime Levelised Cost Of Electricity generation

LP Lineáris programozás

MCDA Többszemponú döntési modellek

NLP Nem lineáris programozási feladat

NPV Nettó jelenérték

PV Fotovillamos napelem

SDS Super Decisions Program

SM Super Mátrix

TF Távfűtés

TH Társasház

ÜHG Üvegházhatású gázok

I. Melléklet - Fajlagos alternatíva költségek

Fajlagos költségek a felhasznált fűtési és villamosenergia-termelési alternatívákra

Családi ház	Egyéni fűtés										Távfűtés					Kogeneráció		
	földgáz	szén	biomassza	elektromos	hőszivattyú (földhő)	hőszivattyú (levegő)	napkollektor	földgáz	szén	biomassza	geotermia	biomassza	geotermia	kommunális hulladék	nukleáris	földgáz	biomassza	
Allandó költség €/kWh	37,00	56,94	56,94	37,00	87,21	83,68	169,48	74,45	126,60	126,60	119,47	126,60	119,47	165,03	113,84	67,01	113,94	
Változó költség €/MWh	3,83	3,76	2,45	9,68	1,71	2,47	0,48	5,96	3,29	3,74	3,84	3,74	3,84	0,05	3,53	2,12	2,12	
Klimahatás €/MWh	7,72	17,59	1,46	5,53	1,38	1,93	0,16	7,72	17,59	1,20	1,38	1,20	1,38	0,07	0,20	2,74	2,74	
Élettani hatás €/MWh	10,68	46,52	46,52	8,96	2,24	3,12	1,67	10,68	12,66	12,66	2,24	12,66	2,24	12,66	2,01	3,79	3,79	

Társasház	Egyéni fűtés										Távfűtés					Kogeneráció		
	földgáz	szén	biomassza	elektromos	hőszivattyú (földhő)	hőszivattyú (levegő)	földgáz	szén	biomassza	geotermia	biomassza	geotermia	kommunális hulladék	nukleáris	földgáz	biomassza		
Allandó költség €/kWh	37,00	56,94	56,94	37,00	83,68	49,63	101,78	101,78	99,48	165,03	163,93	44,66	91,60					
Változó költség €/MWh	3,83	3,76	2,45	9,68	2,47	4,36	3,29	2,15	2,24	0,04	1,93	1,55	1,55					
Klimahatás €/MWh	7,72	17,59	1,46	5,53	1,93	7,72	17,59	1,20	1,38	0,07	0,20	2,74	2,74					
Élettani hatás €/MWh	10,68	46,52	46,52	8,96	3,12	10,68	12,66	12,66	2,24	12,66	2,01	3,79	3,79					

Ipari társasház	Egyéni fűtés										Távfűtés					Kogeneráció		
	földgáz	szén	biomassza	elektromos	földgáz	szén	biomassza	geotermia	kommunális hulladék	nukleáris	földgáz	biomassza	geotermia	kommunális hulladék	nukleáris	földgáz	biomassza	
Allandó költség €/kWh	37,00	56,94	56,94	37,00	83,68	49,63	101,78	101,78	99,48	165,03	163,93	44,66	91,60					
Változó költség €/MWh	3,83	3,76	2,45	9,68	2,47	4,36	3,29	2,15	2,24	0,04	1,93	1,55	1,55					
Klimahatás €/MWh	7,72	17,59	1,46	5,53	1,93	7,72	17,59	1,20	1,38	0,07	0,20	2,74	2,74					
Élettani hatás €/MWh	10,68	46,52	46,52	8,96	3,12	10,68	12,66	12,66	2,24	12,66	2,01	3,79	3,79					

	Villamos energia										Kogeneráció				
	földgáz	szén	biomassza	geotermia	kommunális hulladék	földgáz	szén	biomassza	geotermia	kommunális hulladék	szél	napoterm	víz	földgáz	biomassza
Allandó költség €/kWh	64,30	158,87	189,55	330,50	133,52	219,82	137,97	201,41	204,74	57,87	151,64				
Változó költség €/MWh	4,18	2,35	2,77	1,31	0,04	1,29	1,01	1,76	2,52	3,34	2,22				
Klimahatás €/MWh	8,32	15,82	1,46	0,13	0,07	0,20	0,13	1,37	0,09	6,66	1,17				
Élettani hatás €/MWh	6,41	17,34	33,14	0,99	12,66	1,89	0,99	10,64	0,64	5,13	26,52				

II. Melléklet – Társadalomtudományi felmérés kérdőíve

Sorszám:.....

A VÁLASZADÁS ÖNKÉNTES!

Energiafelhasználás 2018

2018. OKTÓBER/NOVEMBER NAP: ÓRA/PERC:		
Település: <i>(Budapesten kerület)</i>		
Kérdezte: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
K1. Az épület típusa : 1 – városi bérház jellegű épület 2 – lakótelepi épület (előre gyártott panel), 3 – lakótelepi épület (egyéb) 4 – családi ház 5 – többlakásos zöldövezeti épület (kertes sorház, lakópark, villajellegű épület) 6 – többlakásos nem zöldövezeti épület 7 – egyéb, éspedig: 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		
K2. Milyen komfortfokozatú a lakás (hivatalosan)? 1 – összkomfortos (központi fűtés, fürdőszoba és WC is van) 2 – komfortos (fürdőszoba és WC is van) 3 – félkomfortos (fürdőszoba vagy WC van) 4 – komfort nélküli (sem fürdőszoba, sem WC nincs a lakásban) 5 – szükséglakás 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		
K3. Az alábbiak közül melyik energiaforrást használja a háztartás fűtésre, főzésre, világításra vagy más háztartási eszközökhöz? (több válasz megjelölhető) 1 – távfűtés 2 – hálózati (vezetékes) gáz 3 – tartályos PB-gáz 4 – palackos gáz 5 – villany 6 - fa 7 – szén 8 – fűtőolaj 9 – megújuló 10 – egyéb fűtőanyag energiaforrás 0 - nem tudja 99 - nincs válasz		
K4. Előfordulnak-e az alábbiak a lakásban? (több válasz megjelölhető) 1 - beázás 2 – vízesedés a falakban vagy a padlóban 3 - penészedés 4 – rosszul záródó ajtó, ablak 5 – rossz vagy hiányzó hőszigetelés falon, földemen 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		
K5. Milyen anyagi megterhelést jelent az Önök számára az energiaköltségek megfizetése? 1 – mindig nagy megterhelést jelent 2 – télen nagy megterhelést jelent 3 – időnként gondot okoz 4 – általában nem jelent megterhelést 5 – egyáltalán nem jelent gondot 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		
K6. Előfordult-e az utóbbi 12 hónapban, hogy pénzühiány miatt nem tudták határidőre befizetni az áram- vagy gázszámlájukat? 1 – igen 2 – nem 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		
<i>Ha tartályos vagy PB gázt, fát, olajat, szenet, egyéb fűtőanyagot használ fűtésre!</i>		
K7. Előfordult-e az utóbbi 12 hónapban, hogy pénzühiány miatt nem tudtak elegendő tüzelőanyagot venni? 1 – igen 2 – nem 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		
K8. Előfordult-e az elmúlt 12 hónapban, hogy az energiaköltségeik csökkentése érdekében? (több válasz megjelölhető) 1 – nem fűtöttek annyira mint szerettek volna napközben? 2 – nem fűtöttek annyira mint szerettek volna éjszaka? 3 – ha nem volt otthon senki, csökkentették a fűtést? 4 – nem fűtöttek minden fűthető helyiségben? 5 – kevesebbet világítottak vagy korlátozták más elektromos eszközök használatát (pl. mosógép)? 6 – kevesebb meleg vizet használtak? 7 – kevesebbet főztek? 8 – gyűjtött fát, hulladékot (is) használtak fűtésre vagy más energiaszükségletük fedezésére (pl. főzéshez)? 0 - nem tudja 9 - nincs válasz		

K9. Kérem, értékelje, hogy a felsorolt szempontok mennyire jellemzőek a felsorolt fűtési alternatívákra. Értékeljen ötfokozatú skálán, ahol az 1-es jelenti, hogy egyáltalán nem jellemző, az 5-ös pedig, hogy teljes mértékben igaz rá! Ha nem ismeri valamelyik energia előállítási módot, azt hagyja üresen!

	Fűtés-résé-gítés nape-nergi-ával	Földgáz Központi fűtés, konvek-tor	Fa Kály-hával, központi kazán-nal	Villa-mos Hősü-gárzó	Hő-szi-vattyú	Szén vagy lignit tüzelés kályhá-val, kazánnal	Táv hő, gáz	Táv hő Bio-massa, geoter-mia
Van-e tapasztalata az egyes fűtési formákkal kapcsolatban? (1 – van tapasztalata; 2 – van róla ismerete; 3 – nem ismeri)	1-2-3	1 - 2 - 3	1-2-3	1 - 2 - 3	1-2-3	1-2-3	1-2 - 3	1-2-3
Beruházási költség alacsony								
Energiahordozó ára alacsony								
Energiatermelő berendezés...								
a) fogyasztása alacsony								
b) élettartama hosszú								
c) karbantartási igénye kicsi								
Hatékony								
Gazdaságos								
Korszerű								
Tűz- és robbanásveszély nem áll fenn vele kapcsolatban								
Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre								
Biztonságos								
Az energiahordozó kimeríthetetlen								
Kevés hulladékot termel								
Klímaváltozáshoz nem járul hozzá								
Levegőszennyezést nem okoz								
Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti								
Fenntartható								
Megújuló								
Környezetbarát								
Hazai energiahordozó								
Az energiahordozó tárolható								
Jól szabályozható az üzemelés								
Független rendszerként önállóan üzemeltethető								
Fizikai munkát nem igényel								
Megbízható								
Kényelmes								
Sok munkahelyet teremt								
Ingatlan értékét növeli								
Zajhatással nem jár								
Nem okoz kellemetlen szaghatásokat								
Környezetébe harmonikusan illeszkedik								
Javítja az életminőséget								
A médiumok foglalkoznak vele								
Általános oktatásból ismert								
Támogatott								

K10. Hasonlítsa össze a következő szempontokat, aszerint, hogy melyik fontosabb a háztartás fűtésénél. Csak a két szempontot vegye figyelembe! Értékeljen 5 fokozatú skálán! Az 1-es jelentse azt, hogy a baloldali szempont nagyon fontos; a 2-es, hogy valamennyire fontos; a 3-as, hogy a két szempont egymáshoz viszonyítva közömbös; a 4-es, hogy a jobb oldali valamennyire fontos; az 5-ös pedig, hogy nagyon fontos. Használja a válaszadáshoz az 1. KÁRTYALAPOT!

Gazdaságos	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Biztonságos
Környezetbarát	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Gazdaságos
Biztonságos	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Kényelmes
Gazdaságos	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Környezetébe harmonikusan illeszkedik
Támogatott	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Biztonságos
Kényelmes	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Gazdaságos
Környezetbarát	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Biztonságos
Kényelmes	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Környezetbarát
Kényelmes	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Környezetébe harmonikusan illeszkedik
Támogatott	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Környezetbarát
Beruházási költség alacsony	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Fogyasztása alacsony
Hosszú az élettartam	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Kicsi a karbantartási igény
Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Tűz- és robbanásveszély nem áll fenn vele kapcsolatban
Az energiahordozó hosszú távon biztosított	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Levegőszennyezést nem okoz
Kevés hulladékot termel	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Klímaváltozáshoz nem járul hozzá
Hazai energiahordozó	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Független rendszerként önállóan üzemeltethető
Jól szabályozható az üzemelés	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Fizikai munkát nem igényel
Hazai energiahordozó	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Klímaváltozáshoz nem járul hozzá
Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Beruházási költség alacsony
Jól szabályozható az üzemelés	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Tűz- és robbanásveszély nem áll fenn vele kapcsolatban
Levegőszennyezést nem okoz	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Fogyasztása alacsony
Kicsi a karbantartási igény	1 – 2 – 3 – 4 – 5	Fizikai munkát nem igényel

<p>K11. Milyen fűtéssel rendelkeznek és milyen energiahordozót használnak a fűtéshez? (két választ jelöljön!) 1 – távfűtés, melynek energiahordozója: 11 - gáz; 12 - biomassza; 13 - geotermia; 14 - kommunális hulladék; 15 – atomenergia 2 – központi fűtés, melynek energiahordozója: 21 - gáz, 22 - fa, 23 - mezőgazdasági hulladék, 24 - háztartási hulladék, 25 - szén; 26 - lignit; 27 - naphő; 28 - földfő 3 - kályha vagy konvektor fűtés, melynek energiahordozója: 31 - gáz, 32 - fa, 33 - mezőgazdasági hulladék, 34 - háztartási hulladék, 35 - szén; 36 – lignit</p>
0 - nem tudja 9 - nincs válasz
<p>K12. Ön mennyire tart attól, hogy sok embernek túl drága lehet Magyarországon az energia? 1 - egyáltalán nem, 2 - nem nagyon, 3 – valamennyire, 4 – nagyon, 5 - rendkívül</p>
0 - nem tudja 9 - nincs válasz
<p>K13. Valószínűleg találkozott már azzal az elképzeléssel, hogy az utóbbi 100 évben emelkedett az éves átlaghőmérséklet a Földön, és emiatt változik a klíma. Ön mit gondol erről, valóban változik a klíma? Kérem, válasszon a kártyán látható lehetőségek közül! 1 - egyértelműen változik 2 - valószínűleg változik 3 - valószínűleg nem változik 4 - egyértelműen nem változik</p>
0 - nem tudja 9 - nincs válasz
<p>K14. Ön mennyire tart a klímaváltozástól? 1 - Egyáltalán nem 2 - Nem nagyon 3 - Valamennyire 4 - Nagyon 5 - Rendkívül</p>
0 - nem tudja 9 - nincs válasz

K15. Kérem, értékelje, hogy a felsorolt szempontok mennyire jellemzőek a felsorolt villamosenergia-termelési alternatívákra. Értékeljen ötfokozatú skálán, ahol az 1-es jelenti, hogy egyáltalán nem jellemző, az 5-ös pedig, hogy teljes mértékben igaz rá! Ha nem ismeri valamelyik energia előállítási módot, azt hagyja üresen!

Nagyüzemi hő és villamosenergia-termelés	Nap-energia Napelem	Szél-tur- bina	Víz- erőmű	Földgáz	Lignit	Biomassza Fa-tüzelésű	Atom- energia	Geo- termia
Van-e tapasztalata, ismerete a hő- és villamos-energia termelési móddal kapcsolatban? (1 – van tapasztalata; 2 – van róla ismerete; 3 – nem ismeri)	1–2-3	1–2-3	1–2-3	1–2-3	1–2-3	1–2-3	1–2-3	1–2-3
Beruházási költség alacsony								
Energiahordozó ára alacsony								
Hosszú az élettartam								
Hatékony								
Gazdaságos								
Korszerű								
Balesetek kockázata csekély								
A lehetséges balesetek csak kevés embert érintenek								
Természeti csapásoknak ellenáll								
Hosszú távú használata is ártalmatlan a környezetében élő emberekre								
Biztonságos								
Az energiahordozó hosszú távon biztosított								
Klímaváltozáshoz nem járul hozzá								
Levegőszennyezést nem okoz								
Élőlények területét és sokszínűségét nem veszélyezteti								
Nem eredményez veszélyes hulladékot								
A talajt és a vizeket nem szennyezi								
Fenntartható								
Megújuló								
Környezetbarát								
Az energiahordozó sok országból beszerezhető								
Jól szabályozható termelés								
Megbízható								
Sok munkahelyet teremt								
Nem okoz zavaró hatásokat (hang, szag...)								
Környezetébe harmonikusan illeszkedik								
Az életminőséget javítja								
A médiumok sokat foglalkoznak vele								
Ország megítélését javítja								
Általános oktatásból ismert								
Államilag segített beruházások								
Támogatott								

DEMOGRÁFIAI KÉRDÉSEK

D1. Válaszadó neme:	1 – férfi	2 – nő
D2. Hány éves Ön?	..... év	
D3. Mi az Ön legmagasabb iskolai végzettsége?		
1 - 8 osztálynál kevesebb	2 – 8 osztály	3 – szakmunkásképző, szakiskola
4 - érettségi	5 – érettségire épülő szakképesítés	6 – főiskolai vagy egyetemi oklevél vagy doktori fokozat
<i>9 - nincs válasz</i>		
D4. Dolgozik-e Ön, végez-e valamilyen kereső tevékenységet? (ha valamelyik inaktív kategória mellett dolgozik, akkor mondhat kettőt!)	1 – igen, aktív kereső	
2 – munkanélküli	3 - nyugdíjas	4 - CSED/GYED/GYES ellátásban részesül
5 - tanuló	6 - háztartásbeli	7 - egyéb inaktív vagy eltartott
<i>9 - nincs válasz</i>		
D5. Mekkora az Önök lakása?	..... nm szoba (félszoba is szobának számít)	
<i>0 - nem tudja 9 - nincs válasz</i>		
D6. Hányan élnek Önök itt közös háztartásban (közös kasszán) Önt is beleértve?		
És ebből hány fő az eltartott?	Háztartástagok száma:.....fő	Eltartottak száma: .....fő
<i>9 - nincs válasz</i>		
D7. Van-e a háztartástagok között? (több válasz megjelölhető, egy személy több kategóriában is megjelölhető)		
1 – 0-3 éves gyermek	2 – 4-18 éves gyermek	3 – öregségi nyugdíjas
5 – fogyatékkal élő	6 – munkanélküli személy	4 – tartósan beteg
<i>9 - Nincs válasz</i>		
D8. Az Önök családjának összetétele:		
1. Egyedül élő	2. Házaspár vagy együtt élő élettársak	3. Házas-vagy élettársak + 1 gyerek
4. Házas- vagy élettársak + 2 gyerek	5. Házas- vagy élettársak + 3 vagy több gyerek	6. Egy szülő + gyerek(ek)
7. Több generációs háztartás (pl. nagyszülő, szülő és gyerek) 8. Nem rokoni háztartásszerkezet (barátok, albérlőtársak)		
<i>9 - Nincs válasz</i>		
D9. Mekkora területet tud kifűteni a lakásban?	..... nm	
<i>0 - Nem tudja 9 - Nincs válasz</i>		
D10. Hány fokosra szokták fűteni ezeket a helyiségeket napközben?	.....C°	
<i>0 - Nem tudja 9 - Nincs válasz</i>		
D11. Mennyit költ az Önök háztartása energiára egy átlagos hónapban? Fűtési szezonon belüli és kívüli hónapokat átlagolva, minden költséget figyelembe véve (gáz- áram- távhő számla és minden egyéb a háztartásban használt energiaforrás költsége)	..... Ft	
<i>0 - Nem tudja 9 - Nincs válasz</i>		
D12. Mennyi az Önök háztartásának a bevétele egy átlagos hónapban? (Minden bevételt beleszámolva)	..... Ft	
Ha nem kíván pontos összeggel válaszolni, kérjük, az alábbi kártyáról válassza ki, melyik kategóriába tartozik az Önök háztartásának bevétele: <i>Használja a válaszadáshoz a 3. KÁRTYALAPOT!</i>		
Bevétel kategória kódja:	.....
<i>0 - Nem tudja 9 - Nincs válasz</i>		

Köszönjük a közreműködését!