Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés

tézisfüzete

Döntéstámogatás energetikai problémákban, többcélú optimalizálással

Börcsök Endre

Témavezető:

Fülöp János

Alkalmazott Informatika és Alkalmazott Matematika

Doktori Iskola

Budapest, 2022. június

Tartalomjegyzék

I. A kutatás előzményei	1
II. Célkitűzések	2
III. Vizsgálati módszerek	3
IV. Új tudományos eredmények	6
V. Az eredmények hasznosítási lehetősége	8
VI. Irodalmi hivatkozások listája	9
VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	10

Abstract

In my work I present decision supporting techniques, in which linear optimization or multicriteria decision models play a role by solving five energy problems. The elaborated tasks concern state-of-art research in the area of energy, for which such specialized mathematical approaches were applied in almost all cases, that perfectly fits to realistic problems. The fundamental topics of the first three problems are distribution tasks, where the goal is to determine the optimal solution that balances between the supply and consumption side and meets the boundary conditions. All three topics are a closely related problem that emphasizes different aspects of the tasks to be solved. The last two topics describe a possible methodology for the development of the decision criteria system and the determination of the related criteria in the field of energy, through the processing of representative social survey data.

1. Knapsack problem approach

   In the first case, I transformed a distribution problem into a knapsack problem. The importance of which is that this approach is analogous to the "merit order" solution that is commonly used in energetics. Criteria have been monetarized as costs in the objective function coefficients.

2. Multiobjective optimization

   In the second example I implemented a partial sensitivity analysis for criteria weights using multiobjective optimization. The results highlight the key role of the importance of trade-offs between the criteria.

3. Nonlinear optimization

   In the third case, a resource allocation problem was discussed, at which a model taking into account the saturation of the market was developed, where the mathematical definition was formulated as a convex nonlinear objective function case of a distribution problem.

4. Formatting the system of criteria

   In each of the above introduced first three problems only the most important criteria, the “main criteria” played a role in the objective functions. In the fourth section, I describe a method which enables us to explore the set of subcriteria related to the main criteria.

5. Determining the importance weights of criteria

   The last topic presents the systematization and aggregation of decision criteria in a complex environment. The term for merging the criteria is created by the formation of importance weights. I accomplished the unified weighting with a form of the Analytic Network Process (ANP) method adapted to the present problem.

I. A kutatás előzményei

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. Az energiatermelési alternatívákhoz kapcsolódó értékelési szempontok bővülésével, az energetikai alternatívák megítélésére vagy összehasonlítására alkalmas matematikai eszközök, a többszempontú döntési modellek irányába tolódtak el. A kétezres évek elején több nemzetközi szervezet foglalkozott tanulmányaiban az energetikához kapcsolódó szempontok összegyűjtésével, rendszerezésével [1]. 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 költség meghatározása számos szempont esetén nehézségekbe ütközik így szerepét fokozatosan a fontossági súlyokkal ellátott szempontok vették át. Munkámban a döntési szempontok egyéni definiálására dolgoztam ki matematikai módszert és súlyozásukra olyan eljárásokat fejlesztettem tovább, melynél a szempontkapcsolatok föltérképezése nem elvárás. A szemponthalmaz megléte és fontossági értékelése elengedhetetlen a döntéstámogató módszereknél, 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 tartam diagrammal megadott szerkezetét. 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 módon a jelenleg alkalmazott modellek elsősorban disztribúciós feladatként közelítik meg az ilyen jellegű problémákat (TIMES, MESSAGE) [2][3]. Tanulmányomban szereplő energetikai modellek mindegyike, tágan 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.

II. Célkitűzések

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 fokuszál 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. Ilyen parciális érzékenységvizsgálatok elvégzésének módszertana mellett munkámban kitérek olya modellek tárgyalására is melyeknél a szempontsúlyok és velük a célfüggvény együtthatók dinamikusan változnak és így lehetőséget teremtenek a piaci folyamatok pontosabb modellezésére, legyen szó akár a piac telítődéséről vagy tanulási görbék figyelembevételéről. Természetesen a globális stratégiai döntéseknél és hosszú távú energetikai forgatókönyvek kialakításánál is gyakran a monetarizálható szempontok helyett olyan célok és hívószavak kerülnek előtérbe melyek definiálása komoly kihívást jelentenek és megvalósításukhoz nincsen elfogadott módszertan. Egy társadalomtudományi felmérés eredményeinek felhasználásával sikerült eljárást találnom az összetett szempontok értelmezésére súlyozott alszempontok felhasználásával. Az általános szempontrendszer súlyozásával pedig megnyílt a lehetőség a többcélú optimalizálás alkalmazására az energetikai forgatókönyvek szerkesztésénél. Az így kialakított többszempontú döntési modell alapját, természetesen a szempontok feltérképezése és fontossági rangsorának kialakítása adja. Lényeges kiemelni azonban, hogy az energetikában ez a terület 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 többszempontú elemzése szintén egyedülálló eredményeket nyújtott.

III. Vizsgálati módszerek

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

Az így kapott lineáris programozási standard feladatban természetesen az n komponensű x döntési változó és c célfüggvény együtthatóval 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 helyett előjel korlátozatlan változókat, illetve egyenlőségek helyett egyenlőtlenségeket is tartalmazhatnak. Az előjel korlátozatlan változókat két új, nem negatív változó különbségeként állítjuk elő, míg az egyenlőtlenségekkel felírt korlátozó feltételeket újonnan bevezetett eltérés változókkal tudjuk standard alakra hozni. 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. Munkámban bemutatásra 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 [4]. 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:

$min\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^{m} s_i\, p_i y_i\right)$ 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 $C, X \in \mathbb{R}^{mxn}$, továbbá $d \in \mathbb{R}_+^n$ és $g \in \mathbb{R}_+^m$ nemnegatív vektorok, és $y_i \in \{1; 0\}$ diszkrét változók, ahol a relaxált esetben $y_i \in [0; 1]$.

Meg kell említeni azonban, hogy a dolgozatomban tárgyalt disztribúciós feladatok célfüggvényei a többcélú optimalizálás miatt formailag eltérnek a klasszikus felírástól, azonban a harmadik tézispontban megfogalmazott, a piac telítettségét figyelembe vevő probléma [5] tartalmilag is, hiszen csupán konvex nemlineáris célfüggvénnyel fogalmazható meg. A fölépített modell célfüggvényében jelentkező kvadratikus tagok kezelésére eredményesen alkalmazható a Wolfe-módszer [6]. A döntéstámogatás során fontos szerepe van az optimális megoldás meghatározásának azonban szinte hasonlóan komoly kihívást jelent a gyakran egymásnak ellentmondó szempontok figyelembevétele. 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 gyakorlati problémákat tekintve azonban, a megfogalmazott célok igen lényeges tulajdonsága, hogy fontossági rangsorba rendezhetőek. Preferálható célfüggvények esetén az egyik legáltalánosabban alkalmazott módszer a súlyozásos optimalizálási eljárás. 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, $\overline{f_i}(x) = \frac{f_i(x)-m_i}{M_i-m_i}$, $M_i = \max_{x \in L}\{f_i(x)\}$ és $m_i = \min_{x \in L}\{f_i(x)\}$.

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 $A \in \mathbb{R}^{nxn}$ ahol a_{ij} értéke megadja, hogy az i –edik szempont hányszor fontosabb, mint a j –edik.

A páros összehasonlítási mátrixok esetén a szempontsúlyok kiszámításának általánosan használt módja a sajátvektor módszer [7] , ahol a maximális sajátértékhez tartozó sajátvektor $Aw = \lambda_{max} w$, vagyis a Perron vektor, 1-re normált komponensei adják a w_i súlyokat. 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 negyedik tézispontban egy eljárást ismertetek a hierarchikus szempontrendszer kialakításához, míg a nem teljesen kitöltött összehasonlítási mátrix és a fa struktúrába nem kényszeríthető szempontrendszer rangsorának megállapításához az ANP (Analytic Network Proces) modell [8] kerül alkalmazásra. Az ANP módszerben az értékelési szempontokat a hierarchikus rendszerhez hasonlóan a természetük szerint igyekszünk csoportosítani, azonban hálószerűen, a csoportok között is megvalósítunk összehasonlításokat. Az ANP modellben a teljes szempontrendszer összehasonlítási gráf rendszerét, mi több, az alternatívákét is, egy hatalmas mátrixban gyűjtjük össze, az úgynevezett Szuper Mátrixban (SM). A szempontsúlyok és az alternatíva pontszámok egyazon folyamatban, az SM mátrix legnagyobb sajátértékéhez tartozó sajátvektorának meghatározásával alakulnak ki. Az SM mátrix speciális tulajdonságait kihasználva egy egyszerű hatványozási algoritmus ad lehetőséget a sajátvektor meghatározására. Ennek megértéséhez tisztában kell lennünk azzal, hogy a páros összehasonlítási mátrix egy súlyozott irányított gráf algebrai formája, ami remekül kihasználható a szempont súlyok, vagy az SM mátrix esetén az alternatíva pontszámok meghatározásánál. A gráfelméleti megközelítésben a páros összehasonlítási mátrix hatványozása kiemelt szerepet kap, hiszen a mátrix k-adik hatványának tetszőleges $a_{ij}^{(k)}$ eleme megadja a súlyozott irányított gráfban az i-ediktől a j-edik csúcsig vezető k hosszúságú utak súlyösszegét. Amennyiben soronként vagy oszloponként egyre normáljuk a kiindulási mátrixot $\sum_{j=1}^{n} a_{ij} = 1$ vagy $\sum_{i=1}^{n} a_{ij} = 1$, létrehozva így egy sztochasztikus mátrixot, akkor ezen tulajdonsága a hatványozás után is megmarad. Az ilyen mátrixok Markov-láncok átmenet-valószínűségének leírására lettek bevezetve, ahol $a_{ij}^{(k)}$ azt adja meg, hogy milyen valószínűséggel jutok i-ből j 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. A gráfelméleti megközelítés alapján nem csak a páros összehasonlítási mátrix sztochasztikus jellege, de az irreducibilis, aperiodikus és primitív tulajdonsága is garantálható. A felsorolt tulajdonságok ismeretében az SM mátrixból normálással és átlagolással kialakított B ritka mátrix Perron vektorának kiszámolásához a $\lim_{k\to\infty} B^k = ep^T$ határérték meghatározása nyújtja a leginkább kézenfekvő lehetőségét [9]. A Perron vektor ismeretében szempontok és alternatívák teljes rangsora meghatározható.

IV. Új tudományos eredmények

1. Tézis

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 [10].

2. Tézis

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 kiterjeszthető. Az alkalmazás során előállt eredmények rámutatnak az értékelési szempontok között fönnálló fontossági kompromisszumok kiemelt szerepére [11].

3. Tézis

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 szállítási 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 [12].

4. Tézis

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 [13].

5. Tézis

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 [13].

V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

Disszertációm kiindulási pontja optimális forráskiosztás meghatározása volt energetikai problémákban, melyek stratégiai döntések megalapozását teszik lehetővé. A munkámban alkalmazott célfüggvények szempontsúlyainak finom változtatásával eltérő szempontok domboríthatók ki, így eltérő célokra fókuszáló forgatókönyvek dolgozhatók ki. 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 nemlineáris kvadratikus problémát eredményezett. A piac telítődés folyamatának leírása egyszerű lineáris függvényekkel történt, azonban ennek a területnek a részletes feltérképezése is a közeljövő feladata lehet. 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 kiszámolt eredmények lehetőséget teremtenek olyan célfüggvények és optimális energetikai portfóliók megszerkesztésére melyek tökéletesen tükrözik a társadalmi képet az olyan általánosan használt fogalmakról mint fenntartható vagy biztonságos.

VI. Irodalmi hivatkozások listája

[1] 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.

[2] Energy Technology Systems Analysis Programme, Documentation for the TIMES Model, ETSAP, 2016.

[3] International Atomic Energy Agency, Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide, IAEA, Vienna, Austria, 2016.

[4] G. B. Dantzig, Linear Programming and Extension, Princeton University Press, August 1963.

[5] 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.

[6] P. Wolfe, The Simplex Method for Quadratic Programming, Econometrica, Vol. 27, No. 3, pp. 382-398, 1959.

[7] T. L. Saaty, The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, New York, 1980.

[8] T. L. Saaty, Decision Making with Independence and Feedback: The Analytic Network Process, RWS Publications, Pittsburgh, USA, 2001.

[9] C. D. Meyer, Matrix Analysis and Applied Linear Algebra, SIAM, pp. 667, 2000.

VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.