

dc_888_14

**Magyar Tudományos Akadémia
Műszaki Tudományok Osztálya
Közlekedéstudományi Bizottság**

Közlekedési rendszerek fejlesztése és értékelése többtényezős döntési eljárások felhasználásával

Doktori értekezés

Tézisfüzet

Farkas András

Budapest
2014

Tartalomjegyzék

1 Preambulum és a kutatás célkitűzései.....	1
1.1 <i>Kutatási területek, motivációk.....</i>	<i>1</i>
1.2 <i>A kutatási célok meghatározása.....</i>	<i>2</i>
2 Alkalmazott kutatási és vizsgálati módszerek	3
3 Az eredmények összefoglalása.....	3
3.1 <i>Egy új közlekedéspolitikai keretrendszer kidolgozása, valamint a közlekedésmérnöki és építőmérnöki rendszerek és szerkezetek fejlesztése többtényezős döntési eljárások felhasználásával.....</i>	<i>3</i>
3.1.1 Előzmények.....	3
3.1.2 Eredmények.....	4
1. Tézis.....	4
2. Tézis.....	5
3.2 <i>Néhány többtényezős döntéstámogató eljárás kritikai értékelésen alapuló fejlesztése és alkalmazásuk közlekedési és járműmérnöki problémákra.....</i>	<i>7</i>
3.2.1 Előzmények.....	7
3.2.2 Eredmények.....	8
3. Tézis.....	8
4. Tézis.....	9
5. Tézis.....	10
3.3 <i>Egy kombinált, többcélú optimalizálási és többkritériumú elemzési technika kidolgozása és alkalmazása alternatív hajtású városi autóbuszok értékelésére és összehasonlítására.....</i>	<i>11</i>
3.3.1 Előzmények.....	11
3.3.2 Eredmények.....	12
6. Tézis.....	12
4 Közlemények és hivatkozások.....	13
4.1 <i>Kapcsolódó hivatkozások</i>	<i>13</i>
4.2 <i>A szerző tézisekhez felhasznált publikációi.....</i>	<i>15</i>

1 Preambulum és a kutatás célkitűzései

1.1 Kutatási területek, motivációk

A hetvenes évek végétől kezdődően foglalkoztattak a vasúti járművek lengéstani problémái. Egyik korai munkámban a vasúti pályát és a járművet egységes egészként kezelve, a vasúti pálya al- és felépítményi elemeinek dinamikai tulajdonságait egy süllyedő alátámasztású, soktámaszú tartós modell alapján megkonstruált, negyedrendű, lineáris, parciális differenciál-egyenlet megoldásával határoztam meg. A járműfutás statisztikus jellemzőinek kiértékelését a különböző pályákon mért digitalizált regisztrátumok feldolgozása alapján végeztem el. Meghatároztam a hordműrendszeren keresztül a kocsiszekrényre ható pályagerjesztés spektrálsűrűségét és a kritikus frekvenciák tartományait. Járműmérnöki kutatásaimmal egyidejűleg, a logisztikai rendszerek egyik jól körülhatárolható területén Koltai Tamás kollégámmal együtt kidolgoztunk egy rendszerelvű, integrált ipari logisztikai koncepciót, valamint ennek a gráfelméletre és a hálózati folyamokra épülő piaci- és nyereségfedezeti kritériumok szerint optimalizáló modelljét. Az anyagáramlási folyamatokat háromdimenziós (tér, idő és állapot) felfogásban leíró, számítógéppel támogatott módszertant publikációink révén a nemzetközi és a hazai szakmai-tudományos közvélemény kedvezően fogadta. Hamarosan az eljárás konkrét ipari bevezetésére is sor került (MAT Inotai Alumíniumkohó, Senior Váci Kötöttárugyár).

Az előbbi közlekedésmérnöki kutatásokkal párhuzamosan, már egyetemi oktatói pályafutásom kezdeti szakaszában is behatóan foglalkoztam komplex rendszerek, több kritérium szerinti összemérésére, értékelésére, illetve rangsorolására alkalmas döntéseméleti eljárásaival. A kilencvenes évek közepétől érdeklődésem középpontjába a döntéshozatali preferenciák kardinális mérésének egyes megoldatlan problémái kerültek. Ipari tapasztalataim alapján egyértelmű volt, hogy a mérnöki gyakorlatban a tervezési, az értékelési és a kivitelezési döntésekhez szükséges információk jelentős része nem fizikai vagy statisztikai jellegű, hanem szubjektív emberi megítélésből származik. Ezt felismerve, a következő kérdéseket tettem fel magamnak: Vajon lehet-e csupán intuíciókra támaszkodva dönteni és cselekedni? Vajon birtokában vagyunk-e a szükséges logikai készségeknek, továbbá a tudás és az ismeretek olyan szintjének, hogy ezzel helyettesítsük a pusztá empirizmust?

Praxeológiai evidenciák alapján bizonyossággal állítom, hogy az emberi intuíció értékei nem helyettesítendőek, hanem kiegészítendőek a döntési modellekbe beépített adekvát matematikai apparátussal, amely mintegy katalizálja a döntési folyamatot. Azonban a matematika eszköztárának a felhasználása csak jól meghatározható feltételek teljesülése esetén lehetséges. Herbert Simon Nobel-díjas közgazdászprofesszor híres 'satisficing' elmélete szerint viszont a döntéshozók általában nem képesek a szükséges mértékben megfelelni e modellek szigorú előfeltételeinek. Az általam kutatott területeken a legfontosabb ilyen előfeltétel a *tranzitivitás* követelménye volt, amelyet a döntéseméletben konzisztenciának neveznek.

A többtényezős optimalizálási és döntéselemzési módszerek területén az elmúlt húsz évben folytatott kutatásaim alapvető vizsgálati módja egy feltételezett konzisztens állapot tudatos és ellenőrzött elrontása volt a perturbációelmélet segítségével. Részben célszerűen megkonstruált modelljeim viselkedési jellemzőit alaposan megfigyelve, de főképpen a mátrixalgebra, a numerikus módszerek és az optimalizáláselmélet diszciplínáit felhasználva, sikerült néhány nemzetközileg is kedvezően fogadott új matematikai eredményt prezentálnom e módszerek fejlesztésében, illetve hiányosságaik okai feltárásában, Rózsa Pál professzorral folytatott

közös kutatásaim során. E módszereket azután különféle közlekedés-, építő- és járműmérnöki problémák tervezési, összemérési és értékelési feladatainak tudományos igényességű megoldásakor igyekeztem hasznosítani (pl. földalatti vasút nyomvonalainak tervezése és állomásainak a kiválasztása, alternatív üzemmódú városi autóbuszok fejlesztése). Az energetika, a természeti környezet, a forgalomnövekedés és a szociális viszonyok területén különösen az utóbbi időben megfigyelhető negatív jelenségek erőteljesen motiváltak egy újszerű közlekedéspolitikai keretrendszer (modell) kimunkálására.

1.2 A kutatási célok meghatározása

A tézisfüzet az elmúlt 15-20 évben folytatott kutatási tevékenységem eredményeinek tömör összefoglalását tartalmazza. Kutatásaim specifikus céljai és területei a következők voltak:

(i) Az Európai Unió országaiban alkalmazott, az országhatárokon átívelő közlekedéspolitikai koncepciók hatásosságának és hatékonyságának jelentős javítása. A közlekedéspolitikai legyen összhangban a fenntartható közlekedés alapvető céljának folyamatosan növekvő elvi és gyakorlati követelményeivel, egészséges egyensúlyt biztosítson a közlekedés iránti kereslet és kínálat között, ugyanakkor szolgálja az emberi egészség és a környezet megőrzését különösen a levegő- és a zajszennyezés drasztikus csökkentése által. Ezért célszerűnek és fontosnak tartom egy, a jelenlegi és a jövőbeni igényeket egyaránt kielégíteni képes újszerű közlekedéspolitikai keretrendszer kidolgozását.

(ii) A hálózati intelligens közlekedési rendszerek (ITS) hazai alkalmazásának elterjesztéséhez való érdemi hozzájárulás a közlekedési infrastruktúra tervezésének területén egy integrált térinformatikai és döntéstámogató GIS/MCDM rendszer felhasználásával. Az e módszerek révén elérhető előnyök bemutatása különös tekintettel az új infrastruktúra felhasználóira. Ennek gyakorlati megvalósítását egy konkrét nagyvárosi metróhálózat és a hozzá kapcsolódó felszíni infrastruktúra előkészítésének, tervezésének és döntéseinek a példáján keresztül kívánom bemutatni tárgyalva a vonatkozó települési, populációs, geológiai, infrastruktúrális, közlekedéstechnikai, műszaki, gazdasági és szociális kritériumokat és szempontokat.

(iii) A többtényezős döntési eljárások (MCDM) módszertani és alkalmazástechnikai vizsgálata, beleértve átfogó irodalomkutatásra épülő kritikai áttekintésüket, mind a többcélú optimalizálási (MOO) mind a többtényezős döntéselemzési (MCDA) technikákat. Valóságos közlekedésmérnöki, kultúrmérnöki és járműmérnöki projektekre, illetve problémákra történő alkalmazhatóságuk feltárása.

(iv) Néhány világszerte széleskörűen alkalmazott MCDM módszer néhány ismert, de ezidáig megnyugtatóan nem megoldott hiányosságának szisztematikus elemzése és kiváltó okainak magyarázata szigorú matematikai alapokon. E hiányosságok orvoslása a mátrixelmélet, a numerikus módszerek és az optimalizáláselmélet eszköztárának a felhasználásával. Az MCDM technikák felhasználási lehetőségeinek kiterjesztése több fontos közgazdasági és műszaki területre. Ismert és népszerű eljárások minőségi továbbfejlesztése (elsősorban az analytic hierarchy process módszer; AHP), oly módon, hogy a származtatott matematikai eredmények élvonalbeli nemzetközi kutatásokkal összevetve is legyenek relevánsak.

(v) Egy új, kombinált, a többtényezős utilitáselméletre épülő értékelési technika kidolgozása, amely markánsabban érvényesítené a humán döntéshozatal sajátosságait mint a meglévő módszerek többsége, ami ezáltal megbízhatóbb rangsorképzést és értékelést biztosítana a közlekedési projektek számára is. A megalkotandó modell vegye figyelembe a különböző mérési skálákhoz tartozó alapadatok kezelésének szigorú méréselméleti követelményeit is.

2 Alkalmazott kutatási és vizsgálati módszerek

Kutatásmódszertani filozófiám szerint eredményes tudományos kutatás folytatásának egyik elengedhetetlen feltétele a mások által közölt eredmények minél átfogóbb ismerete és azok etikus felhasználása. A disszertációban jelentős számú a felhasznált források mennyisége és különös figyelmet fordítottam azok színvonalára is. Kutatásaim tárgyköréből adódóan az alkalmazott vizsgálati módszerek elsősorban elméleti jellegűek. Ilyenkor a szerző fokozott felelőssége az elméleti úton származtatott eredmények megbízhatóságáról való hiteles meggyőződés, az alkalmazhatóság korlátainak egzakt ismerete és közlése. Utóbbi célokat kétféle módon próbáltam kielégíteni. Egyfelől, az elméleti eredményeket numerikusan ellenőriztem és igyekeztem azokat az olvasók számára közérthetően illusztrálni. A célszerűen megválasztott mintapéldák nagyban elősegítették az eredmények gyakorlati alkalmazásával kapcsolatos első tapasztalatok megszerzését is. A numerikus elemzések folyamán standard szoftvereket (Mathematica, SPSS) és saját fejlesztésű programokat (MAROM, CROSS-IMPACT) használtam fel. Másfelől, egy-egy fontosabbnak vélt kutatási részeredményről nemzetközi konferenciákon (GAMM, VSDIA, NMCM, ILAS, MEB) számoltam be, ahol formális és informális diszkussziók során megismertem más kutatók nézeteit és véleményét a saját munkámról, továbbá sokszor új, eredeti ötleteket is kaptam. Hasonló célt szolgáltak a külföldi egyetemeken (University of Pittsburgh, Carnegie Mellon University, Universität Bielefeld, University of Technology, Helsinki) és hazai kutatóhelyeken (MTA SZTAKI, BME) meghirdetett kutatási szemináriumok, amelyeket meghívott előadóként tartottam, néhány alkalommal Rózsa Pál professzorral közösen. A javasolt módszerek és eljárások különféle közlekedésmérnöki, kultúrmérnöki, járműmérnöki és makroökonómiai problémákra történt alkalmazása utóbbi szakterületeken is lehetővé tette néhány eredetinek tekinthető tudományos eredmény származtatását és hasznosítását. Az értekezésben az alkalmazások bemutatásánál azok kellő részletességű és mások által is reprodukálható tárgyalására törekedtem.

3 Az eredmények összefoglalása

3.1 Egy új közlekedéspolitikai keretrendszer kidolgozása, valamint a közlekedésmérnöki és építőmérnöki rendszerek és szerkezetek fejlesztése többtényezős döntési eljárások felhasználásával

3.1.1 Előzmények

Alapos irodalomkutatás eredményeképpen; kiemelten Litman (2009), Richardson (1999), Rodrigue (2013), KonSULT (2002), Fleischer (2009), Transport Hierarchy (2013), továbbá közzétett Európai Unió; WHITE PAPER (2011) és hazai; NHDP (2007), UTDS (2013), kormány szintű közlekedésfejlesztési dokumentum áttanulmányozása és saját szakmai értékelésem alapján a jelenleg érvényben lévő közlekedéspolitikai koncepciók és különösen azok gyakorlati megvalósulását tekintve, több nem kielégítően megválaszolt kérdéskört,

illetőleg nem elég hatékonyan működő területet azonosítottam. Megemlítendő a közlekedési infrastruktúra elmaradottsága a fejlődő régiókban, a tevékenységi rendszer és a közlekedési szolgáltatások között meglévő egyensúlyhiányok, a nemzetközi kereskedelmi szállítmányozás és árueosztás hiányosságai, az utazások gyors növekedésének következtében előálló szűk keresztmetszeti problémák a városi közlekedésben, a sürgősen elhárítandó környezeti gondok, a közlekedési infrastruktúra különböző felhasználóinak érdekellentétei különös tekintettel a közösségi felhasználók és a környezetvédők speciális igényeire, és nem utolsósorban, a közlekedésfejlesztési projektek multidiszciplináris jellegéből fakadóan (műszaki, pénzügyi, környezeti, szociális, institutionális, politikai, stb.) a rendszerelv érvényesítésének a nehézségei.

Megkísértem tudományos megközelítésű válaszokat adni eme kérdésekre. Egy strukturált modell segítségével magas prioritású célok felállítását határoztam el, amely enyhítene a jelenlegi közlekedési nehézségeken globális, regionális és városi szinteken egyaránt. Emellett érvelni kívántam a többszemélyes döntéstámogató eljárások fokozottabb alkalmazása mellett. Elsődleges célként a fenntarthatósági szempontokat hangsúlyoztam. Tapasztalataim szerint - ellentétben a fejlett országokkal - hazánkban jelentős elmaradás mutatkozik a modern és technikailag már Magyarországon is jórészt rendelkezésre álló egyes intelligens közlekedési rendszerek (ITS) alkalmazása területén. Megítélésem szerint itthon, többek között speciális térinformatikai rendszerek; lásd Malczewski (1999), Sharifi és Retsios (2004), ILWIS (2008), válhatnak fontos eszközzé a közlekedési és építőmérnöki projektek és szerkezetek tervezési, ellenőrzési és értékelési munkáinál. Ezt a közelítésmódot elfogadva, magam is elkészítettem egy elképzelt projekt megvalósíthatósági tanulmányát, amelyben a világ számos országában már bevezetett magas színvonalú műszaki, informatikai és számítástechnikai eszközök hazai elterjesztését is szorgalmaztam.

Átfogó elemzést végeztem a nemzetközi tudományos és szakmai közvélemény által elismert MOO és MCDA módszerek (lásd Appendix A), és különös tekintettel e módszereknek a közlekedésmérnöki, kultúrmérnöki és járműmérnöki gyakorlatban való alkalmazását tárgyaló közlemények kritikai szellemű feldolgozásával. Az áttekintés legfontosabb forrásmunkái Machalis és Anpo (2007), Marler és Arora (2004), Morisugi (2000), Vassilev (2005), Malczewski (2006) és Deluka-Tibljias et al. (2013) voltak. Önmagam is szereztem közvetlen tapasztalatokat, így például különböző konstrukciójú hídszerkezetek, továbbá épületeknél felhasználható előfeszített betonszerkezetek komplex, többszemponú értékelése kapcsán.

3.1.2 Eredmények

Az elért eredményeket az 1. Tézisben és a 2. Tézisben foglaltam össze.

1. Tézis

Hatékony közlekedési rendszer sikeres megvalósítása az Európai Unióban az integráció *sine qua non*-ja. Mai modern korunkban a közlekedéspolitikai igen sok bonyolult, egyúttal azonban kétségtelenül vonzó szakmai kihívással szembesül. Ilyenek, egyebek között az utazási és a szállítványozási igények gyors növekedése és az ezzel együtt járó negatív következmények a globális felmelegedésre; a környezeti externáliák egyre fokozódó szerepe a levegőszennyezés növekedésében és ennek káros hatásai az emberi egészségre; a helyváltoztatási (utazási) kereslet és kínálat közötti regionális és lokális egyensúlyi problémák; az országokon átvezető

transzport hiányosságai különösképpen a szükséges logisztikai szolgáltatások és a kielégítő színvonalú intermodális árutovábbítás biztosítása. A fenntartható közlekedés érdekében ezen kihívásokat, illetve hiányosságokat felismerve egy újszerű szekvenciális közlekedéspolitikai (STP) keretrendszert (modellt) alkottam meg. E modell fundamentumaként egy lépéssorozat megvalósítását javasoltam négy szekvenciális közlekedéspolitikai célkitűzés (prioritások) megfogalmazásával, amelyek a következők:

Célkitűzés #1: A KÖZLEKEDÉSI IGÉNYEK IRÁNTI KERESLET MINIMALIZÁLÁSA

Célkitűzés #2: FOKOZATOS ÁTTÉRÉS MÁSFAJTA KÖZLEKEDÉSI MÓDOKRA

Célkitűzés #3: A MEGLÉVŐ KÖZLEKEDÉSI INFRASTRUKTÚRA HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE

Célkitűzés #4: MEGÚJÍTHATÓ ENERGIÁKON ALAPULÓ KÖZLEKEDÉSI ESZKÖZÖK HOZZÁFÉRHETŐSÉGÉNEK ÉS HASZNÁLATÁNAK NÖVELÉSE

A modell minden egyes fázisának egységes belső szerkezete van. Valamennyire kidolgoztam a partikuláris célokat, megmutattam előnyeiket és hátrányaikat, továbbá hozzájuk rendeltem azokat az instrumentális eszközöket, amelyekkel ezek a célok bizonyosan elérhetők lennének. Specifikus indikátorokat is javasoltam az egyes fázisok kimeneteinek a mérésére és a kitűzött célok teljesülésének az ellenőrzésére. Az elvi koncepcióhoz és az STP modellhez egy olyan többfokozatú, rekurzív, dinamikus programozási modellt dolgoztam ki, amely lehetővé tenné optimális közlekedéspolitikák kialakítását és azok gyakorlati implementálhatóságát. A matematikai modell általános formában a következő célfüggvénnyel írható le (az egyes jelöléseket, azok definícióit és az operanduszok értelmezését a disszertációban részletesen tárgyaltam. Az STP modellre: $N=4$):

$$f_N^*(S_n) = \underset{d_1, d_2, \dots, d_N}{\text{optimum}} \{r_1(d_1, S_1) \otimes r_2(d_2, S_2) \otimes \dots \otimes r_N(d_N, S_N)\}.$$

Az STP modell hasznos lehet mind globális mind helyi értelemben a közlekedési kormányzati szervek, a közlekedési szolgáltatásokat nyújtó szervezetek, a helyi hatóságok, közlekedés és környezetmérnökök, szocio-közgazdászok, de mindenekelőtt a közlekedési infrastruktúrát használó nagyközönség és általában a városi közösségek számára. Az STP alapul szolgálhatna a közlekedési infrastruktúra fejlesztési irányainak a kitűzéséhez is. Vizsgálataim alapján kijelenthető, hogy a modell sok szempontból felülmúlja hasonló társait, élesen definiált, radikális céljai, koherens volta és logikus szerkezeti felépítése tekintetében, valamint abban is, hogy a megvalósítást célzó eszközrendszerére igen széles kínálatot sorakoztat fel. A modell fejlesztésének lehetséges jövőbeni irányait tekintve az egyes fokozatok közötti negatív visszacsatolások beépítését tartanám még szükségesnek, amely a célelérés hatásosságának és hatékonyságának további növelését eredményezné.

Az 1. Tézishez kapcsolódó publikáció: Farkas (2014b).

2. Tézis

Megállapítottam, hogy a közlekedési és a kultúrmérnöki projektek többségénél a résztvevő felek (finanszírozók, tervezők, kivitelezők, éit.) és különösen a közösségi felhasználók képviselőinek bevonása a szükségeshez képest nem, vagy csak részben valósul meg. Az ilyen

beruházások egy másik jellegzetessége az, hogy tipikusan multidiszciplináris természetük következtében valamennyi lényeges jellemzőjük együttes figyelembe vétele és kihatásaik tanulmányozása nem, illetőleg csak felszínesen oldható meg a gyakorlatban a mai napig is általánosan használt tradicionális tervezési, konstrukciós és értékelési módszerekkel, valamint a technikai eszközök korlátai miatt.

Ezek a tények ösztönöztek egy adekvát, a közlekedési és építőmérnöki projektek specifikus követelményeihez a lehető legjobban illeszkedő tudományosan megalapozott eszközrendszer kidolgozására. Ebben a témakörben a következő eredményeket értem el:

(i) Először is igyekeztem minél teljesebb körben felmérni és ismertetni azokat a többcélú optimalizálási és többtényezős döntéselemzési módszereket, amelyek a nemzetközi szakmai közvélemény által egyértelműen elismertek (mintegy 60 eljárás). E módszerek hasonló és megkülönböztető jegyeit alapos mérlegelés tárgyává tettem. Összegyűjtöttem és röviden tárgyaltam jónéhány megvalósult és reprezentatívnak tekinthető alkalmazásukat, illetve alkalmazhatóságuk feltételeit különféle közlekedési és építőmérnöki problémák esetében. (a disszertáció 2. Fejezete és Függelék A). Végezetül megkíséreltem megalapozott érveket felsorakoztatni elméleti és gyakorlati szempontból egyaránt, e módszerek ezen szakterületeken történő indokolt alkalmazásának elősegítésére.

(ii) A tervezés folyamata a közlekedési projektek esetében is a lehetséges alternatívák feltárásával kezdődik, majd a kritériumok és a jellemzők specifikálásával folytatódik és végül egy kiválasztott javaslat meghatározásával zárul. Én éppen egy fordított eljárást javasolok, nevezetesen az ún. értékközpontú közelítésmódot, amely először a jellemzők specifikálására koncentrál (az értékstruktúra meghatározása), amelyek a döntéselemzés alapelemeit képezik. Mármost a helyes eljárásnak azt gondolom ha csak ezután tekintjük és dolgozzuk ki a valódi értékek alapján megvalósításra ajánlott megoldásokat, amelyeket így, egy előzetesen meghatározott érték- és kritérium struktúra alapján lehet értékelni és a legkedvezőbb megoldást kiválasztani. Ily módon, a döntési alternatívákat a döntési probléma elérendő céljait realizálni képes kívánatos értékek (jellemzők) szerint lehet generálni és a legjobbat így meghatározni. Az értékközpontú közelítésmód támogatására, közlekedési hálózatokra kidolgozott egy általam megkonstruált felülről-lefelé irányított felépítésű, négy szintű hierarchiát proponáltam, amely szerint először a fő cél(ok) definiálása történik meg, a többi hierarchiai szinten pedig a részcélok identifikálását és a hozzájuk rendelt multidiszciplináris jellegű karakterisztikus jellemzők megállapítását végezzük el.

(iii) A közlekedési infrastruktúra általam javasolt tervezési eljárásának a bemutatására, intelligens közlekedési rendszereket (ITS) alkalmava, a javasolt közelítésmód és tervezési módszertan gyakorlati megvalósítását is végrehajtottam korunk modern városi közösségi közlekedésének egyik alapvető fontosságú területén, egy földalatti vasúthálózat tervezésének és értékelésének a példáján keresztül egy integrált térinformatikai és döntéstámogató (GIS/MCDA) módszertan segítségével. Ebben egy távérzékelésre, digitális képfeldolgozásra, valamint georeferenciájú vektor- és raszterterképek előállítására kifejlesztett térinformatikai rendszert (ILWIS) használtam fel, amely egy komplex, térbeli, többtényezős döntéselemzési modult (SMCA) is magában foglal igen erős grafikus és analitikus interface képességekkel. A metróhálózat nyomvonalai és állomásai legjobb alternatívájának a kiválasztását a kidolgozott raszterterképek alapján a minimális impedanciájú opció származtatása alapján határoztam meg. A tervezési folyamat lépéseit az értekezés részletesen tartalmazza. (Application 1).

A 2. Tézishez kapcsolódó publikációk: Farkas (2009a), (2009b), (2010), (2011b).

3.2 Néhány többtényezős döntéstámogató eljárás kritikai értékelésen alapuló fejlesztése és alkalmazásuk közlekedési és járműmérnöki problémákra

3.2.1 Előzmények

A kilencvenes évek végén érdeklődésem – a témakör tudományos és gyakorlati jelentőségét felismerve – a döntéshozatali preferenciák kardinális mérésének problémái felé fordult. A közlekedésmérnöki gyakorlat során is gyakran felmerül az egyéni és csoportos döntéshozatali preferenciák különbségeit, sőt az arányait is értelmezni és matematikailag korrekt módon kezelni képes *kardinális* hasznosságelmélet alkalmazásának az igénye. Ekkor már világszerte elterjedten alkalmazott, rendkívül népszerű technika volt az analytic hierachy process (AHP) többkritériumú döntésméleti eljárás és módszertan [Thomas Saaty (1977), (1986)], ami a döntéshozók preferenciáit a legmagasabb mérési szinten, azaz arányskálán méri. Ugyanakkor a szakirodalomban számos kritikát is közöltek az AHP vélelmezett, vagy valóságos torzításairól, hibáiról, sőt ellentmondásairól is. Különösen sok bírálat célpontja volt az ún. rangsorfordítás jelensége, amely az alkalmazások nagy hányadában előfordult, mivel a módszer által generált prioritási rangsor esetenként nem a legjobban preferált, maximális hasznosságú alternatívát határozza meg legjobb döntési opcióként; lásd Watson és Freeling (1983), Saaty és Vargas (1984), Belton és Gear (1983) Belton és Gear (1985), Vargas (1985), Dyer és Wendell (1985), Harker és Vargas (1987), Dyer (1990), Saaty (1990) és Harker és Vargas (1990). A jelenség okait és eredetét feltáró formális elemzést, illetve érdemi magyarázatot tartalmazó dolgozatok azonban nem jelentek meg azidáig a vonatkozó szakirodalomban. Sejtésem az volt, hogy a helyenként szokatlanul éles vita elfedi a lényegi okfejtést, mert a probléma tisztán matematikai természetű és visszavezethető a humán döntéshozók korlátozott racionalitására, esetenként irracionális viselkedésére. Néhány évi közös munkát követően szerzőtársammal Rózsa Pál professzorral közösen, nemzetközi szinten elsőként adtunk explicit megoldást a rangsorfordítási probléma néhány lehetséges alapesetére. Megmutattuk, hogy ez a jelenség az AHP módszer inherens sajátossága, ha a becslések alapján megkonstruált páros összemérési mátrix (PCM) *nem* tranzitív (azaz ha inkonzisztens).

Magától értedődően felmerült bennünk a kérdés, hogy miképpen lehetne ilyen inkonzisztens mátrixok (PCM) kardinális konzisztenciáján javítani. E kérdésre a válaszunk egy olyan tranzitív (tökéletesen konzisztens) mátrix meghatározása volt, ami az eredetileg inkonzisztens PCM legjobb közelítését adja a hibanégyzet összeg minimuma értelmében. Ebben a kérdéskörben először a Chu et al. (1979), Blankmeyer (1987) és Chu (1998) által alkalmazott hasonló stratégiákat tanulmányoztuk. Ezután, társszerzőimmel Peter Lancaster és Rózsa Pál professzorokkal az erre a problémára megfogalmazott lineáris és nemlineáris optimalizálási feladatok megoldására olyan eredeti, újszerű eljárásokat javasoltunk, amelyeknek a publikálásukat követően igen kedvező nemzetközi visszhangja volt. Ugyanis a lineáris optimalizálási feladat (szuboptimális megoldás) révén sikerült meghatározni a nemlineáris probléma egy olyan célszerű (és pozitív) induló megoldását, továbbá zárt alakban felírni a vonatkozó ferdén szimmetrikus együttható mátrixot, amely eredmények nagyban elősegítették azt, hogy megmutassuk a nemlineáris feladatnál alkalmazott és általunk módosított Newton-Kantorovics-féle szukcesszív iteráció konvergenciáját, illetve bizonyításokat közöljünk azok egyértelműségére vonatkozóan (esetleges többszörös megoldások). Kidolgozott optimalizálási módszereink elméleti eredményeinkkel összhangban álló viselkedését nagyszámú, különböző méretű és inkonzisztenciájú mátrix empirikus vizsgálatával teszteltük és verifikáltuk.

Tranzitív, 1-rangú közelítő mátrixok előállításával lehetővé vált hogy az ilyen szimmetrikusan reciprok (SR) tulajdonságú mátrixokra egy speciális új perturbációs struktúrát javasoljunk, amely modell gyakorlati hasznosságát az AHP döntési eljárásnál, valamint egy aszimmetrikus geometriai pályahiba feltételezésével vasúti járművek nemlineáris gerjesztésének a példáján keresztül igazoltunk. Egy, a legkisebb négyzetek módszerére épülő rekurzív algoritmust és annak számítógépes programját is kifejlesztettük majd megmutattuk, hogy ilyen struktúrájú mátrixok esetében kölcsönös megfeleltethetőség létezik a sajátvektor módszer és a legkisebb négyzetek elvére épülő eljárás között.

3.2.2 Eredmények

Az elért eredményeket a 3. Tézis, a 4. Tézis és az 5. Tézis tartalmazzák.

3. Tézis

A végső prioritási sorrendnél bekövetkező rangsorfordítás miatt az AHP módszert erőteljesen kritizálták a szakirodalomban. Bármilyen furcsán is hangzik mégis tény, hogy az opponensek kifogásoló érveiket kizárólag numerikus elemzésekre, sőt sokszor csak verbális spekulációra alapozták. Sejtésemet, melyszerint eme nemkívánatos jelenség bekövetkezése bizonyosan az AHP módszer által felhasznált matematikai apparátus törvényszerűségeinek tulajdonítható az alábbiakban összefoglalt eredmények igazolták. Inkonzisztens, SR mátrixok legjobb közelítő tranzitív mátrixának a generálásával még néhány további, a gyakorlatban is hasznosnak bizonyult eredményt is sikerült származtatni.

(i) Definiáltuk az $n \times n$ -es, \mathbf{A} -val jelölt szimmetrikusan reciprok (SR) mátrixot, bevezettük a \mathbf{B} -vel jelölt tranzitív mátrix fogalmát és megadtuk spektrális tulajdonságaikat. (Proposition 3.1).

(ii) Néhány specifikus SR perturbált tranzitív mátrixra (tehát inkonzisztens esetekre) explicit formában meghatároztuk a hozzájuk tartozó principális (Perron) sajátvektorokat, továbbá egzakt intervallumokat határoztunk meg, amelyeken belül a végső prioritási rangsor fordítása bizonyosan bekövetkezik bármilyen nemtranzitív SR mátrix esetében. (Theorem 3.1 és Theorem D.1, Appendix D).

(iii) Egy tranzitív mátrix tetszőlegesen kiválasztott sorának (és hozzátartozó oszlopának) elemeinél egy multiplikatív típusú, $\delta_i \neq 1$, $i=1,2,\dots,n-1$, pozitív elemű perturbációt vezettünk be. Jelölje az ily módon perturbált mátrixot \mathbf{A}_p . Megfelelő algebrai műveletekből álló levezetés végrehajtása után az \mathbf{A}_p karakterisztikus polinomja az alábbi formában adódott. (A bizonyítást az Appendix B tartalmazza):

$$p_n^p(\lambda) \equiv \det \mathbf{K}_p(\lambda) = \lambda^{n-3} \left\{ \lambda^3 - n\lambda^2 + (n-1) \sum_{i=1}^{n-1} (1-\delta_i) \left(1 - \frac{1}{\delta_i}\right) - \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{1}{\delta_i}\right) \sum_{i=1}^{n-1} (1-\delta_i) \right\}.$$

(iv) Az \mathbf{A} és a \mathbf{B} mátrixok értelmezési tartományát kiterjesztettük komplex számokra. A $p_n^p(\lambda)$ karakterisztikus polinomot n^3 -al osztva, valamint bevezetve a $\mu = \lambda/n$ normalizált sajátértéket a trinom egyenlet általános formáját a μ függvényében az alábbi formában kaptuk meg:

$$L(\mu) = \mu^3 - \mu^2 - C_p = 0.$$

Megmutattuk, hogy a trinom egyenlet gyökeit, azaz az \mathbf{A}_P mátrix nem zérus sajátértékeit hogyan befolyásolja a C_P konstans tag változása, ha vizsgálatainkat – az általánosság korlátozása nélkül – egyetlen elempárra ($a_{12}-a_{21}$) szűkítjük le. Jelölje ezt az SR mátrixot \mathbf{A}_S . Ekkor a konstans tag C_S , az $r=\sqrt{|\delta|}$ és a $t=\arccos\sqrt{\delta}$ bevezetésével az alábbi formában adódik:

$$C_S = \frac{n-2}{n^3} \left(r e^{it} - \frac{1}{r} e^{-it} \right)^2.$$

A gyakorlati alkalmazások szempontjából azoknak az eseteknek van különleges jelentőségük, amikor ez a kifejezés valós. Három lehetséges esetet különböztettünk meg, és mindegyikre kidolgoztunk egy-egy releváns gyakorlati alkalmazást. Bemutattuk egy döntésméleti, egy makroökonomiai és egy járműdinamikai feladat megoldását, valamint megadtuk a vonatkozó szakterületi konkluziókat. (Applications 4,5,6).

A 3. Tézishez kapcsolódó publikációk: Farkas (2007), (2008), Farkas és Rózsa (1996b), (2001), és Farkas, Rózsa és Stubnya (1998), (1999a), (1999b), (2000).

4. Tézis

Ez a tézis az emberi szubjektív becslések következtében előálló inkonzisztencia problémák jobbításával kapcsolatban elért eredményeket foglalja össze. Ez a célkitűzés az \mathbf{A} mátrixnak egy olyan \mathbf{B} tranzitív mátrixszal való approximálását jelenti, ami az \mathbf{A} legjobb közelítését adja valamilyen értelemben. A főbb eredmények az alábbiak voltak:

(i) Tekintsük először a szuboptimális lineáris problémát, azaz a $\|\mathbf{WA} - \mathbf{EW}\|_F^2$ Frobenius-norma minimalizálását, ahol a \mathbf{W} egy pozitív definit diagonál mátrix akkor és csakis akkor, ha az ismeretlen \mathbf{w} súlyvektor valamennyi eleme pozitív. Vezessük be az $n \times n$ méretű \mathbf{E} mátrixot, amelynek legyen minden eleme egységnyi. Hogy elkerüljük a $\mathbf{W}=0$ triviális megoldást, egy inhomogén lineáris feltétel hozzáadásával és egy adott pozitív $\boldsymbol{\phi}^T = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$ vektor bevezetésével azt a $\mathbf{W}_0(\boldsymbol{\phi})$ mátrixot kell megtalálnunk, amelyre

$$S_0^2(\boldsymbol{\phi}) := \inf_{\boldsymbol{\phi}^T \mathbf{w} = 1} \|\mathbf{WA} - \mathbf{EW}\|_F^2 = \|\mathbf{W}_0 \mathbf{A} - \mathbf{E} \mathbf{W}_0\|_F^2.$$

Megmutattuk, hogy létezik egy olyan optimális $\boldsymbol{\phi}_{\text{opt}}$ választás és egy hozzátartozó $\mathbf{W}_0(\boldsymbol{\phi}_{\text{opt}})$ mátrix, amellyel $S_0(\boldsymbol{\phi}_{\text{opt}}) \leq S_0(\boldsymbol{\phi})$ minden $\boldsymbol{\phi} > 0$ esetén. Ezzel a $\boldsymbol{\phi}_{\text{opt}}$ segítségével a lineáris probléma egy olyan $\hat{\mathbf{w}}$ megoldását kaptuk, ami felülmúlja az irodalomban ezidáig közzétett eredményeket. (Theorem 4.1).

(ii) Tekintsük az alábbi minimalizálási feladatot a nemlineáris probléma megoldásához:

$$S^2(\mathbf{w}) := \|\mathbf{A} - \mathbf{B}\|_F^2 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} - \frac{w_j}{w_i} \right)^2.$$

Felírva egy stacionárius pont létezésének a szükséges feltételeit az $\mathbf{R}(\mathbf{w})\mathbf{w}=0$ homogén nemlineáris egyenlet adódik, ahol az $\mathbf{R}(\mathbf{w})$ ferdén szimmetrikus, változoktól függő mátrixra az alábbi zárt formulát kaptuk:

$$\mathbf{R}(\mathbf{w}) = \mathbf{W}^{-2} (\mathbf{A} - \mathbf{W}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{W}) - (\mathbf{A} - \mathbf{W}^{-1}\mathbf{E}\mathbf{W})^T \mathbf{W}^{-2}.$$

Megmutattuk, hogy ez a kifejezés általánosítva is (nem szükségszerűen csak SR mátrixokra) hasznos lehet, azaz általános pozitív mátrixok tranzitív mátrixszal történő approximációjához. A Newton-Kantorovics módszer alkalmazhatósága érdekében egy $\mathbf{c}^T \mathbf{w} = 0$, lineáris egyenlőségi feltételt hozzáadva a nemlineáris egyenletekhez a $\mathbf{c}^T = [1, 0, \dots, 0]$ vektor biztosítja a \mathbf{w} -re kapott megoldásoknak egy korlátos halmazban tartását az iterációs lépések folyamán. Egy, az \mathbf{A} SR mátrixra célszerűen felvett normalizálási feltétel a $w_1 = 1$. Az így megkonstruált n inhomogén nemlineáris egyenletből álló rendszerrel végzett numerikus számítások sokasága azt mutatta, hogy az iteráció mindig konvergens és pozitív elemű \mathbf{w}^* stacionárius vektorokat produkál. A Hesse-féle mátrix minden általunk megoldott feladatra pozitív definit volt, ezért mindegyik stacionárius vektor lokális minimumot reprezentált. (Propositions 4.1, 4.2, 4.3 és 4.4).

(iii) Szükséges megvizsgálni az (ii)-ben részletezett inhomogén nemlineáris egyenletrendszer megoldásainak az egyértelműségét különösen ha tekintetbe vesszük a legkisebb négyzetek módszerére épülő különféle optimalizálási problémák jól ismert nemkonvex természetét. Az egyértelműségi problémával kapcsolatban elégséges feltételeket és bizonyításokat adtunk meg többszörös megoldások előfordulásának az eseteire. (Propositions 4.5, 4.6 és Theorem 4.2).

(iv) Felhasználva az (ii)-ben generált 1-rangú tranzitív mátrixokat, egy a felhasználó által definiálható rugalmas, 2 paramétertől függő exponenciális függvénnyel megadott multiplikatív perturbációt vezettünk be, amelyet sikeresen alkalmaztunk vasúti járművek nemlineáris lengéstani problémáira adekvát módon megkonstruált, a bemenő pályagerjesztéseket leíró és explicit módon meghatározott hermitikus mátrix, az ún. input spektrális sűrűség mátrix formájában. (Proposition 4.7 és Application 7).

A 4. Tézishez kapcsolódó publikációk: Farkas, Lancaster és Rózsa (2003), (2005), Farkas, György és Rózsa (2004) és Farkas és Rózsa (2004).

5. Tézis

Pozitív elemű SR mátrixok kiegyenlítésére (balancing), egy a legkisebb négyzetek módszerét felhasználó rekurzív algoritmust javasoltam. Az algoritmus kifejlesztésével összefüggésben az alábbi eredmények születtek:

(i) Egy rekurzív, ún. reziduális iterációs algoritmust (triple R-I) fejlesztettem ki, egyrangú mátrixok egymást követő hozzáigazított sorozatával, arra a megalapozott feltételezésre építve, hogy egy \mathbf{A} pozitív SR mátrix egy a_{ij} elemének 'legjobb' közelítése $w_j^{*(0)} / w_i^{*(0)}$. Ennélfogva

$$\left[\frac{w_i^{*(0)}}{w_j^{*(0)}} a_{ij} \right] = \mathbf{W}_0^* \mathbf{A} \mathbf{W}_0^{*(-1)} \approx \mathbf{E}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Alapötletem szerint az egység elemű \mathbf{E} mátrix approximációjánál az iteráció további lépéseiben folyamatos javulást kívántam elérni. Ennek megvalósítására bevezettem egy $n \times n$ -es pozitív elemű \mathbf{H}_k mátrixot és a következő rekurziós szabályt alkalmaztam: $\mathbf{H}_k = \mathbf{W}_{k-1} \mathbf{H}_{k-1} \mathbf{W}_{k-1}$. A \mathbf{H}_k update segítségével - az iteráció induló vektoraként felhasználva a 4. Tézis (i)-ben leírt módon nyert $\hat{\mathbf{w}}$ szuboptimális megoldást- mindegyik egymás után következő k -edik iterációs lépésben a következő nemlineáris egyenlet oldottam meg:

$$\{\mathbf{W}_k^{-2} (\mathbf{H}_k - \mathbf{W}_k^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W}_k) - (\mathbf{H}_k - \mathbf{W}_k^{-1} \mathbf{E} \mathbf{W}_k)^T \mathbf{W}_k^{-2}\} \mathbf{W}_k \mathbf{e} = 0, \quad k = 1, 2, \dots$$

A kidolgozott algoritmus futása $k=q$ lépésig tart, amikor is a numerikus hiba kisebbé válik egy előzetesen specifikált tetszőlegesen kicsiny $\varepsilon > 0$ -nál. Bebizonyítottam, hogy az iteráció során a $\{\mathbf{H}_k\}$ és a $\{\mathbf{W}_k\}$ sorozatok a \mathbf{H}_q^* reziduális határmátrixhoz, illetve az \mathbf{I}_n , egységmátrixhoz konvergálnak. (Theorem 5.1, Proposition 5.1 és Appendix E).

(ii) Megmutattam, hogy pozitív SR mátrixok esetében a sajátvektor módszer és a legkisebb négyzetekre épülő eljárás között egy kölcsönösen megfeleltethető közvetlen kapcsolat létezik.

(iii) Belátható, hogy a rekurzív algoritmus ekvivalens egy diagonális mátrixszal végzett hasonlósági transzformációval, mivel a nemnegatív elemű mátrixok osztályára vonatkozó elmélet szerint az SR mátrix \mathbf{A} egy teljesen reducibilis mátrix. Bebizonyítottam, hogy az iteráció végén a stacionárius pontban kapott \mathbf{H}_q^* határmátrix és hasonlóképpen az egységmátrix \mathbf{I}_n (utóbbi triviális módon) egyaránt kiegyenlített, miután mindkettő vonalösszeg-szimmetrikus mátrix. (Corollary 5.1).

(iv) Kiindulva a páronkénti összemérési mátrixok elemeinek valószínűségi természetéből (származtatásuk következtében), azt feltételeztem, hogy az elemek lognormális eloszlású valószínűségi változókat reprezentálnak. Az inkonzisztencia hibák reprezentatív statisztikai jellemzőiként a perturbált pozitív elemű SR mátrixok inkonzisztenciájának mérésére két új statisztikát vezettem be, a \mathbf{H}_q^* mátrix elemeinek geometriai átlagát és azok varianciáját. Egy átfogó numerikus elemzés végrehajtása azt a sejtésemet erősítette meg, hogy az iteráció terminálásakor megszilárduló \mathbf{H}_q^* mátrix h_{ij}^* elemeiből számított geometriai tapasztalati szórás hasonló tulajdonságokkal bír, mint a Thomas Saaty által javasolt, az AHP eljárásban általánosan alkalmazott μ inkonzisztencia mérték. (Propositions 5.2 és 5.3).

Az 5. Tézishez kapcsolódó publikációk: Farkas (2012) és Farkas és Rózsa (2013).

3.3 Egy kombinált, többcélú optimalizálási és többkritériumú elemzési technika kidolgozása és alkalmazása alternatív hajtású városi autóbuszok értékelésére és összehasonlítására

3.3.1 Előzmények

A többtényezős utilitáselmélet jeles képviselőinek a dolgozatai; Dyer és Sarin (1979), Zeleny (1985), Horsky és Rao (1984), továbbá Hwang et al. (1993), jelentékeny fejlődést indítottak el a szakterületen, amikor azt javasolták, hogy egy döntéshozónak egy kiválasztott objektum iránti preferenciája legyen a kérdéses objektumnak egy ideális objektumtól való távolságaként meghatározva. Minél közelebb van egy objektum az ideálishoz (ahol utóbbi egy hipotetikus objektum), nyilvánvalóan annál nagyobb a döntéshozónak az iránta kifejezett preferenciája. A távolság egy összetett mérőszám, ami az alternatívákat (rendszerek, projektek, termékek, személyek) az őket meghatározó attribútumok mutatószámai alapján minősíti.

Felismertem, hogy ezen módszerek nagy többsége, amelyeket igen elterjedten használnak a gyakorlatban is, az alternatívákat *egyféle* partikuláris mérési skálán értékeli. Ezzel szemben, mivel az alternatívákat többnyire sok attribútum szerint jellemezzük, amelyek igencsak eltérő tulajdonságokat reprezentálnak, ezért a minősítő jellemzőket különböző mérési skálákhoz

szükséges hozzárendelni. A fenti hiányosságok kiküszöbölése érdekében egy olyan kombinált MOO/MCDA értékelő eljárás több változatát is kifejlesztettem, amelyek képesek a különböző, élesen és életlenül (un. imponderábilák) definiált jellemzők szimultán kvalifikálására.

Az utóbbi években kutatásokat folytattam modern technológiáknak (megújítható energiákra épülő hajtásrendszerek) a városi közösségi közlekedésben való alkalmazása kérdéskörében, amely problémát úgy tekintem, mint a fenntartható urbanizációs fejlesztések egyik lehetséges záloga. Az alternatív meghajtású járművek fő paramétere maga az üzemanyag típusa. Ezen gépjárművek műszaki, kémiai, forgalmi, gazdaságossági, stb. jellemzői a hagyományos járművektől teljesen eltérőek. Világszerte megfigyelhető alternatív hajtású járművek intenzív műszaki fejlesztése. A vonatkozó nemzetközi publikációk közül kiemelhető Tzeng et al. (2005), Romm (2006) és Offer et al. (2010). A városi közösségi közlekedés számára a már rendelkezésre álló lehetséges alternatívák közül az alacsony környezetterhelésű és hatékony működésű autóbuszok széleskörű üzembeállítása feltétlenül javasolható.

3.3.2 Eredmények

A fenti területeken elért kutatási eredményeimet a 6. Tézis tartalmazza.

6. Tézis

Kettős kihívás inspirált egy kombinált MOO/MCDA többkritériumú értékelési eljárás kifejlesztésére, amelyet MultiAttRIBUTE Object Measurement (MAROM)-nak neveztem el. Az első, az előzményekben már említett hasonló célú módszerek sajátossága, miszerint ezek az eljárások csak egy bizonyos, rögzített mérési skálán képesek értékelni, holott az alternatívák általában egészen különböző tulajdonságokkal bírnak, amiből azonnal következik, hogy jellemző tulajdonságaikat különböző mérési skálákhoz kell hozzárendelni. A második ok hosszú gyakorlati tapasztalatom folyamánya, nevezetesen, hogy a döntéshozó egyének (és csoportok) döntő többsége nem képes megfelelni a racionális döntéshozatal von-Neumann és Morgenstern-féle döntéshozatali axiómákból levezethető követelményeknek, különösképpen relatív összehasonlítások esetén. A fenti kihívásokra a következő válaszokat adtam:

(i) A több kritérium szerint jellemezhető rendszerek összehasonlító értékelésére kidolgozott MAROM technika az alternatívák abszolút mérésén alapul és az összemérendő objektumok eredeti a_{ik} adataival dolgozik függetlenül attól, hogy az adatokat szubjektív emberi becsléssel, vagy fizikai mérések alapján származtatjuk. A módszer tökéletesen illeszkedik a méréselmélet követelményeihez, mert alapelve szerint az egyes jellemzőket a hozzájuk tartozó mérési skálához rendeli hozzá a skála szerkezetére nézve invariáns transzformációk alapján.

(ii) Újszerű elemként, mindegyik mérési skálán (névleges, sorrendi, intervallum és arány) *metrikus* távolságfüggvényeket alkalmaztam: $d_{ik}^l = b_i - a_{ik}^{l(i)}$ a k -edik alternatívának az i -edik attribútum szerinti a b_i referenciaponttól való távolságának a mérésére; figyelembe vettem az egyes jellemzők fontosságának a súlyszámait: w_i^l és egy ε_k véletlen hibátényezőt. Utóbbi a mérési hibákat hivatott reprezentálni. A k -edik alternatívának az 'ideális' alternatívától való távolságának a mérésére, az l -edik döntéshozóra vonatkozóan a következő modellt javasoltam:

$$\bar{d}_k^l = \sum_{i=1}^m w_i^l d_{ik}^l + \varepsilon_k^l, \quad k = 1, \dots, n, \quad l = 1, \dots, q.$$

Ezt követően, mindegyik döntéshozóra az alternatívák pontszámát határoztam meg az egyedi skálákon, amit az így kapott pontszámok normalizálási és aggregációs eljárásai követtek az alternatívákra vonatkozó aggregált összpontszám kiszámítása érdekében.

(iii) Bizonyítást adtam arra vonatkozóan, hogy az alternatívák értékelését kifejező aggregált mérőszámok (relative standings) intervallum skálán értelmezettek. (Theorem 6.1).

(iv) Megmutattam, hogy a módszer outputja egyszerűen “feltranszformálható” a legmagasabb szintű kardinális mérési skálára, azaz az arányskálára. Ily módon, ha a transzformált adatokat páronkénti arányokba rendezzük, akkor azok közvetlenül beépíthetők az AHP módszertanába. Ennek nagy előnye az, hogy az így megkonstruált páronkénti összemérési mátrix (PCM) tökéletesen konzisztens.

(v) Numerikus evidenciák alapján úgy tűnik, hogy az általam kifejlesztett MAROM módszer reálisabb értékelési eredményeket produkál mint a hasonló összemérési módszerek, amint azt egy időszereű közlekedési és környezetmérnöki problémakörrel kapcsolatos vizsgálataim, továbbá korábbi másféle munkáim eredményei is demonstráltak. Itt jegyzem meg, hogy természetesen magam is azzal a nézettel azonosulok, amely szerint ilyen következtetéseket csak nagyon óvatosan és körültekintően lehet meghozni a szigorú elméleti (matematikai) bizonyíthatóság hiányában. A MAROM eljárást felhasználva az értekezésben részletesen tárgyaltam városi közösségi közlekedésre külföldön kifejlesztett alternatív hajtású autóbuszok többletényezőssé összehasonlító értékelését. Számítógéppel támogatott dinamikus szimulációs modell (KSIM) segítségével meghatároztam műszaki, emissziós és gazdaságossági jellemzőik alakulásának hosszabb időtávra vonatkozó projekcióit. E vizsgálattal megállapítottam, hogy a hidrogénüzemű buszok fejlesztése tekinthető a legígéretesebbnek (Application 8).

A 6. Tézishez kapcsolódó publikációk: Farkas (2004), (2006), (2013) és (2014a).

4 Közlemények és hivatkozások

4.1 Kapcsolódó hivatkozások

- Belton, V. and Gear, T. (1983), “On a short-coming on Saaty's method of analytic hierarchies”. *Omega*. **11**. (1983), 228-230
- Belton, V. and Gear, T. (1985), “The legitimacy of rank reversal - A comment”. *Omega*. **13**. (1985), 143-144
- Blankmeyer, E. (1987), ”Approaches to consistency adjustments”. *Journal of Optimization Theory and Applications*. **54**. (1987), 479-488
- Chu, M.T. (1998), “On the optimal consistent approximation to pairwise comparison matrices”. *Linear Algebra and Its Applications*. **272**. (1998), 155-168
- Chu, A.T.W., Kalaba, R.E. and Springarn, K. (1979), “A comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets”. *Journal of Optimization Theory and Applications*. **27**. (1979), 531-538
- Deluka-Tibljás, A., Karleusa, B. and Dragicevic, N. (2013), “Review of multi-criteria analysis methods application in decision making about transport infrastructure“. *Gradevinar*. **65**. (2013), 619-631

- Dyer, J.S. (1990), "Remark on the Analytic Hierarchy Process". *Management Science*. **36**. (1990), 249-258
- Dyer, J.S. and Sarin, R. (1979), "Measurable multi-attribute value functions". *Operations Research*. **27**. (1979), 810-822
- Dyer, J.S. and Wendell, R.E. (1985), "A Critique of the Analytic Hierarchy Process". Working Paper. 84/85-424. Department of Management, The University of Texas at Austin, 1985
- Fleischer, T. (2009): Transport Policy in the European Union from an Eastern Perspective. Project Report. Institute for World Economics of the Hungarian Academy of Sciences. Budapest. No.193. (2009), p.17
- Harker, P.T. and Vargas, L.G. (1987), "The theory of ratio scale estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process". *Management Science*. **33**. (1987), 1383-1403
- Harker, P.T. and Vargas, L.G. (1990), "Reply to 'Remarks on the Analytic Hierarchy Process'". *Management Science*. **36**. (1990), 269-273
- Horsky, D. and Rao, M.R. (1984), "Estimation of attribute weights from preference comparisons". *Management Science*. **30**. (1984), 801-822.
- Hwang, C-L., Lai, Y-J. and Liu, T-Y. (1993), "A new approach for multiple objective decision making". *Computational Operations Research*. **20**. (1993), 889-899
- ILWIS (2008), Integrated Land and Water Information System. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Enschede, Netherlands
<http://52north.org/index> accessed: 03/09/08
- KonSULT (2002): An Internet-based International Knowledgebase on Sustainable Urban Land Use and Transport. 2002. <http://www.transportconnect.net> accessed: 11/01/14
- Litman, T. (2009): "Sustainable Transportation and TDM Planning. Online TDM Encyclopedia. Victoria Transport Policy Institute. 2009. <http://www.vtpi.org/tdm/tdm67> retrieved 04/04/14
- Macharis, C. and Ampo, J. (2007): The Use of Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) for the Evaluation of Transport Projects: A Review. Research Report. Dept. MOSI - Transport and Logistics. Vrije Universiteit, Brussel, Belgium. 2007
- Malczewski, J. (2006), "GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature". *International Journal of Geographical Information Science*. **20**. (2006), 703-726
- Malczewski, J. (1999): GIS and Multicriteria Decision Analysis. Wiley. New York. 1999, p.392.
- Morisugi, H. (2000), "Evaluation methodologies of transportation projects in Japan". *Transport Policy*. **7**. (2000), 35-40
- NHDP Transport Operational Program. (KÖZOP), (2007)
http://www.nfu.hu/download/1770/K%C3%96ZOP_070712_hu.pdf accessed 04/12/13
- Offer, G.I., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R. and Brandon, N.P. (2010), "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system". *Energy Policy*. **38**. (2010), 24-29
- Richardson, B. (1999), "Towards a policy on a sustainable transportation system". *Transportation Research Board*. No.1670. TRB. (1999), 27-34
- Rodrigue, J-P. (2013): The Geography of Transport Systems. Third Edition. Routledge. New York. 2013, p.416

- Romm, J. (2006), "The car and fuel of the future." *Energy Policy*. **34**. (2006), 2609-2614
- Saaty, T.L. (1977), "A scaling method for priorities in hierarchical structures". *Journal of Mathematical Psychology*. **15**. (1977), 234-281
- Saaty, T.L. (1986), "Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process". *Management Science*. **32**. (1986), 841-855
- Saaty, T.L. (1990), "An exposition of the AHP in reply to the paper 'Remarks on the Analytic Hierarchy Process'." *Management Science*. **36**. (1990), 259-268
- Saaty, T.L. and Vargas. L.G. (1984), "The legitimacy of rank reversal". *Omega*. **12**. (1984), 514-516.
- Sharifi, M.A. and Retsios, V. (2004), "Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis". *Journal of Telecommunications and Information Technology*. **3**. (2004), 1-11
- Transport Hierarchy. (2013): Institution of Mechanical Engineers. Westminster. London. UK 2013
<http://www.imeche.org/knowledge/policy/transport/policy/transport-hierarchy> accessed 03/01/14
- Tzeng, G-H, Lin, C-W. and Opricovic, S. (2005), "Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation". *Energy Policy*. **33**. (2005), 1373-1383
- Unified Transport Development Strategy. (2013), UTDS (2007-2020)
http://www.khem.gov.hu/data/cms1919520/EKFS_feh_r_k_nyv_EN_0902.pdf accessed 02/12/13
- Vargas, L.G. (1985), "A rejoinder". *Omega*. **13**. (1985), p.249
- Watson, S.R., and Freeling, A.N.S. (1983), "Comment on: assessing attribute weights by ratios". *Omega*. **11**. (1983), 1-13
- WHITE PAPER. (2011): Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. European Commission, 2011
<http://eur-ex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0144:EN:NOT> accessed 20/12/13
- Zeleny, M. (1985): Linear Multiobjective Programming. In: Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer Verlag. London. 1985

4.2 A szerző tézisekhez felhasznált publikációi

- Farkas, A. and Rózsa, P. (1996b): "An analysis of rank preservation and reversal in the analytic hierarchy process". *Periodica Polytechnica*. (Social. & Management Sciences). **4**. (1996), 63-78
- Farkas, A., Rózsa, P. and Stubnya, E. (1998): "Symmetrically reciprocal matrices I. Spectral properties". IMC Working Paper Series. No.15/98. International Management Center. Budapest, 1998, p.30.
- Farkas, A., Rózsa, P. and Stubnya, E. (1999a): "Spectral properties of symmetrically reciprocal matrices". *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. **79**. S3. (1999), 859-860
- Farkas, A., Rózsa, P. and Stubnya, E. (1999b): "Transitive matrices and their applications". *Linear Algebra and Its Applications*. **302-303**. (1999), 423-433
- Farkas, A., Rózsa, P. and Stubnya, E. (2000): "Spectral properties of input spectral density matrices". Proceedings of the 6th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies. (Ed.: Zobory, I.). Technical University, Budapest, VSDIA'98, November 9-11, 1998, TU Budapest, 467-476, 2000

- Farkas, A. and Rózsa, P. (2001): "Data perturbations of matrices of pairwise comparisons". *Annals of Operations Research*. **101**. (2001), 401-425
- Farkas, A., Lancaster, P. and Rózsa, P. (2003): "Consistency adjustments of pairwise comparison matrices". *Numerical Linear Algebra with Applications*. **10**. (2003), 689-700
- Farkas, A. and Rózsa, P. (2004): "On the non-uniqueness of the solution to the least-squares optimization of pairwise comparison matrices". *Acta Polytechnica Hungarica*. **1**. (2004), 1-22
- Farkas, A., György, A. and Rózsa, P. (2004): "On the spectrum of pairwise comparison matrices". *Linear Algebra and Its Applications*. **385**. (2004), 443-462
- Farkas, A. (2004): "Metric distance functions". Working Paper. No.1/2004. Budapest Polytechnic. Budapest, p.10
- Farkas, A., Lancaster, P. and Rózsa, P. (2005): "Approximation of positive matrices by transitive matrices". *Computers and Mathematics with Applications*. **49**. (2005), 1033-1039
- Farkas, A. (2006): "Die Kardinale Messung von Verbraucherpräferenzen". *Planung & Analyse. Zeitschrift für Marktforschung und Marketing*. **21**. (2006), 75-78
- Farkas, A. (2007): "The analysis of the principal eigenvector of pairwise comparison matrices". *Acta Polytechnica Hungarica*. **4**. (2007), 99-115.
- Farkas, A. (2008): "On deriving the spectrum of augmented pairwise comparison matrices". *Acta Technica Jaurinensis*. **1**. (2008), 69-84
- Farkas, A. (2009a): "Route/site selection of urban transportation facilities: An integrated GIS/MCDM approach". Proceedings of the 7th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking. June 5-6, 2009, Óbuda University, Budapest, 169-184, 2009
- Farkas, A. (2009b): "An intelligent GIS-based route/site selection plan of a metro-rail network". Chapter 51. In: (Eds.: Rudas, I., Fodor, J. and Kacprzyk, J.), *Towards Intelligent Engineering and Information Technology*. Springer. Berlin Heidelberg, 719-734. 2009, p.736
- Farkas, A. (2010): "The use of the AHP in civil engineering projects". Proceedings of the 8th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking. June 4-5, 2010, Budapest, Óbuda University, Budapest, 157-169, 2010
- Farkas, A. (2011b): "Multi-criteria comparison of bridge designs". *Acta Polytechnica Hungarica*. **8**. (2011), 173-191
- Farkas, A. (2012): "A recursive least-squares algorithm for SR matrices". (in Mathematica code). Óbuda University, Budapest, Hungary, 2012, p.6.
http://kgk.uni-obuda.hu/sites/default/files/Farkas-Rozsa-appendix_CJOR.pdf
- Farkas, A. and Rózsa, P. (2013): "A recursive least-squares algorithm for pairwise comparison matrices". *Central European Journal of Operations Research*. **21**. (2013), 817-843
- Farkas, A. (2013): "A comparison of MCDA techniques TOPSIS and MAROM in evaluating bus alternative-fuel modes". Proceedings of the 11th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking, May 31-June 1, 2013, Budapest, Hungary, Óbuda University, Budapest, 181-194, 2013
- Farkas, A. (2014a): "An interaction-based scenario and evaluation of alternative fuel-modes of buses". *Acta Polytechnica Hungarica*. **11**. (2014), 205-225
- Farkas, A. (2014b): "A sequential transport policy framework for sustainable transport". In: (Ed.: Michelberger, P.), *Management, Enterprise and Benchmarking in the 21st Century*. Óbuda University. Budapest, Hungary. 315-325, 2014, p.413