

- MTA Doktori Értekezés –

**A közösségi közlekedés fejlesztésére vonatkozó preferenciák új
módszertani megközelítése**

**A new methodological approach toward the public transportation
development preferences**

Írta: Duleba Szabolcs János (Ph.D.)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

aki a Magyar Tudományos Akadémia doktora címre pályázik

a

Magyar Tudományos Akadémia

Műszaki Tudományok Osztálya (VI.)

Közlekedéstudományi és Járműtudományi Bizottságában.

Budapest

2023

Nyilatkozat

Alulírott Duleba Szabolcs János kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Dolgozatomban a szó szerinti idézetet idézőjelek között ferde szedéssel jelöltem. A vastag szedés a fontosabb gondolatok kiemelését szolgálja az egyes esetekben.

Budapest, 2023. január 21.

.....

Duleba Szabolcs János

Készült a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedéstechnológiai és Közlekedésüzemi Tanszékén
(H-1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.)

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik közös munkánk által hozzájárultak eredményeim eléréséhez. A módszertan alapos megismeréséhez és továbbgondolásához jelentős segítséget nyújtott néhai Rapcsák Tamás professzor, valamint kiváló munkatársai, Bozóki Sándor és Fülöp János. Hálával tartozom a metódus közlekedési problémákban való alkalmazásának megismertetése miatt japán meghívó professzoromnak, Tsutomu Mishinának és kollégáknak Yoshiaki Shimazakinak. Ezen felül néhai Bokor Zoltán és témavezetője, Tánczos Lászlóné professzor asszony szakmai támogatására is mindig számíthattam. Érdemi segítséget kaptam munkahelyemtől, mind Varga István, mind Tóth János vezetőim által, valamint Török Ádám, Csiszár Csaba, Tettamanti Tamás és Esztergár-Kiss Domokos kollégák által. Eredményeim elérésében segítettek doktoranduszaim, Sarbast Moslem, és Ahmad Alkharabsheh, valamint kutatótársaim Szádoczki Zsombor, Blahota István és Fatma Kutlu Gundogdu. Hálas vagyok a családomnak és a hozzám közel állóknak a támogatásért, és a nagymértékű megértésért, amelyet a dolgozat megírása és az azt megelőző évtizedes kutatómunka megkövetelt tőlük.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	9
1.1. Motiváció.....	9
1.2. Az értekezés felépítése.....	10
1.3. Az értekezés előzménye	11
1.4. Alkalmazott módszerek és eljárások	16
2. Tetszőleges hierarchia-szinten lévő preferenciák új, hatékonyabb felmérése: egy Parsimonious AHP-modell a közlekedés-fejlesztési preferenciákra	21
2.1. Az AHP egyik hátránya.....	21
2.2. Egy lehetséges megoldás az összehasonlítások redukciójára: a PAHP	22
2.3. A közlekedési felmérésekre javasolt többszintű Parsimonious AHP modell bemutatása	24
2.4. Belső konzisztencia-mérés, immanens vizsgálat.....	26
2.5. Közösségi közlekedési igény felmérése többszintű PAHP módszerrel.....	27
3. A közlekedési preferenciák aggregálásának új útja: átlag-számítás helyett optimum-keresés.....	44
3.1. Az eddigi preferencia aggregálási eljárások	44
3.2. A javasolt új, távolság-alapú eljárások és szimulációs tesztelésük.....	46
3.3. Valós közlekedési felmérés-adatokon való tesztelés	54
4. A közlekedésben érintett csoportok (stakeholderek) vélemény-szintézisének új megközelítése optimalizáció által	61
4.1. Mainstream módszerek a közlekedés-fejlesztési vélemény-szintézis kialakítására	61
4.2. A javasolt új megközelítés	62
4.3. Az új eljárás tesztelése egy valós közlekedés-fejlesztési problémán	68
5. Konszenzus keresés a közlekedés-fejlesztési felmérés bizonytalanságának a figyelembevételével: javaslat egy új fuzzy aggregálási eljárásra	76
5.1. Eddigi Fuzzy modellek a közlekedésben.....	76
5.2. A javasolt konszenzus-meghatározás fuzzy környezetben.....	79
5.3. A javasolt konszenzus eljárás fuzzy környezetben, egy valós közlekedési preferencia-felmérésen tesztelve	84
6. Összefoglalás- Új tudományos eredmények összefoglalása	93
6.1. Új tudományos eredmények	93
6.2. A tudományos eredmények gyakorlati hasznosíthatósága.....	95
Fontosabb publikációk jegyzéke.....	97
Tézispontokhoz kapcsolódó saját publikációk jegyzéke.....	106
Mellékletek.....	108

Ábrajegyzék

1. ábra: A közösségi buszközlekedés kínálati preferencia elemei.....	13. oldal
2. ábra: A többszintű döntési struktúra Parsimonious szintje.....	28. oldal
3. ábra: A különböző aggregálási eljárások összehasonlítása nagy számú kitöltő esetén rangkorreláció szempontjából.....	48. oldal
4. ábra: A különböző aggregálási eljárások összehasonlítása kis csoportos kitöltések esetén rangkorreláció szempontjából.....	50. oldal
5. ábra: 1000 szimulációs eset átlagos Kendall W értéke a különböző aggregálási eljárások esetén kiscsoportos döntéshozatali eljárásoknál.....	52. oldal
6. ábra: A kiszámított G index, Spearman korreláció és Kendall W két dimenzióban.....	53. oldal
7. ábra: A kiszámított G index, Spearman korreláció és Kendall W három dimenzióban.....	54. oldal
8. ábra: A javasolt, optimális vektor-súly megállapításon alapuló konszenzus-keresési módszer 3-dimenziós demonstrációja.....	63. oldal
9. ábra: A trianguláris fuzzy szám tagsági függvénye.....	77. oldal
10. ábra: A közösségi buszközlekedés kínálati elemeinek díj-megközelítéssel bővített modellje.....	86. oldal

Táblázatok jegyzéke

1. Táblázat: A hierarchikus döntési struktúrában szereplő közlekedési kínálati elemek értelmezése.....13. oldal
2. Táblázat: A qxq konzisztens, teoretikus páros összehasonlítási mátrix szerkezete.....18. oldal
3. Táblázat: A Random Index (RI) értékei a random módon generált mátrixok esetében különböző mátrix nagyságoknál.....19. oldal
4. Táblázat: a PAHP referencia-kritériumok páros összehasonlítása.....29. oldal
5. Táblázat: Utas értékelések eredménye közvetlen értékelések és a számított Parsimonious pontszámok.....29. oldal
6. Táblázat: Az új PAHP eljárás normalizált eredménye a vizsgált közlekedési fejlesztési elemek fontosságára vonatkozóan.....31. oldal
7. Táblázat: Belső (immanens) elemzés a több szintű PAHP eljárásban.....32. oldal
8. Táblázat: A PAHP felmérés első körének demográfiai összetétele.....34. oldal
9. Táblázat: A PAHP felmérés második fázisának demográfiai jellemzői.....35. oldal
10. Táblázat: Az októberi, hagyományos AHP nagymintás felmérés jellemzőinek és a decemberi új, PAHP felmérés jellemzőinek összehasonlítása.....36. oldal
11. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az AHP felmérés eredményeképpen 1. szint.....38. oldal
12. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az AHP felmérés eredményeképpen 2. szint.....38. oldal
13. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az AHP felmérés eredményeképpen 3. szint.....38. oldal
14. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az új, PAHP felmérés eredményeképpen 1.szint.....39. oldal
15. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az új, PAHP felmérés eredményeképpen 2.szint.....39. oldal
16. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az új, PAHP felmérés eredményeképpen 3. szint.....40. oldal
17. Táblázat: A Spearman rang-korrelációs koefficiens a két eljárás eredményei között az 1-es hierarchia szinten.....40. oldal
18. Táblázat: A Spearman rang-korrelációs koefficiens a két eljárás eredményei között a 2-es hierarchia szinten.....41. oldal
19. Táblázat: A Spearman rang-korrelációs koefficiens a két eljárás eredményei között a 3-as hierarchia szinten.....41. oldal
20. Táblázat: A vizsgált öt eljárás G index-e, Spearman-indexe és Kendall W értéke, és azok szórása $n = 2$ esetre.....53. oldal
21. Táblázat: A vizsgált öt eljárás G index-e, Spearman-indexe és Kendall W értéke, és azok szórása $n = 3$ esetre.....54. oldal
22. Táblázat: a 2018-as mersini AHP közlekedés-fejlesztési preferencia-felmérésből származó kitöltési adatok.....55. oldal
23. Táblázat: Az EDBAM számítás alapján kapott közös vektor.....56. oldal
24. Táblázat: A Kendall W számítása az EDBAM esetében.....57. oldal
25. Táblázat: Az ADBAM eljárással kapott közös preferencia vektor.....57. oldal
26. Táblázat: AIP WAMM által előállított közös preferencia vektor.....57. oldal

27. Táblázat: A Kendall W érték számítása AIP WAMM aggregálás esetén.....	58. oldal
28. Táblázat: Az AIP WGMM eljárás által kapott közös vektor.....	58. oldal
29. Táblázat: A Kendall W érték számítása AIP WGMM aggregálás esetén.....	58. oldal
30. Táblázat: Csoportonkénti prioritások az 1-es hierarchia szinten.....	68. oldal
31. Táblázat: Csoportonkénti prioritások a 2-es hierarchia szinten.....	68. oldal
32. Táblázat: Csoportonkénti prioritások a 3-as hierarchia szinten.....	69. oldal
33. Táblázat: Az új konszenzuális eljárás súlyai az 1-es szinten.....	69. oldal
34. Táblázat: Az új konszenzuális eljárás súlyai a 2-es szinten.....	69. oldal
35. Táblázat: Az új konszenzuális eljárás súlyai a 3-as szinten.....	70. oldal
36. Táblázat: Az új, távolság-alapú konszenzus Kendall korrelációs értéke az 1-es hierarchia szinten.....	70. oldal
37. Táblázat A 0-szint módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei az 1-es szinten.....	71. oldal
38. Táblázat: Az IAHP módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei az 1-es szinten.....	71. oldal
39. Táblázat: Az új, távolság-alapú konszenzus Kendall korrelációs értéke a 2-es hierarchia szinten.....	71. oldal
40. Táblázat A 0-szint módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 2-es szinten.....	72. oldal
41. Táblázat: Az IAHP módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 2-es szinten.....	72. oldal
42. Táblázat: Az új, távolság-alapú konszenzus Kendall korrelációs értéke a 3-as hierarchia szinten.....	73. oldal
43. Táblázat A 0-szint módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 3-as szinten.....	73. oldal
44. Táblázat: Az IAHP módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 3-as szinten.....	74. oldal
45. Táblázat: A nyelvi skála konvertálása fuzzy számokká.....	77. oldal
46. Táblázat: Intuitív fuzzy kifejezések az összehasonlításokhoz.....	81. oldal
47. Táblázat: Amman és a felmérés mintájának demográfiai jellemzői 2019-ben.....	85. oldal
48. Táblázat: Az 1-es szinten szereplő kritériumok súlypontoszámainak számítása a közelekedési szakértők csoportjának esetében.....	87. oldal
49. Táblázat: Az entropikus eljárás csoport-súlyai.....	87. oldal
50. Táblázat: Az entropikus végső súlyok és rangsor.....	87. oldal
51. Táblázat: Az új eljárásból számított szintenkénti csoport-súlyok.....	88. oldal
52. Táblázat: Az általam javasolt eljárás végső konszenzus súlyai és rangsora.....	89. oldal
53. Táblázat: A két konszenzus eljárás összehasonlítása a Garuti-index-szel.....	91. oldal

Nómenklatúra

Betűszavak

AHP – Analytic Hierarchy Process

DCM – Discrete Choice Modelling

MCDA – Multi-Criteria Decision Aid

MCDM – Multi-Criteria Decision-Making

CR – Consistency Ratio

RI – Random Index

PAHP – Parsimonious Analytic Hierarchy Process

AIJ – Aggregation of Individual Judgements

AIP WAMM – Aggregation of Individual Priorities Weighted Arithmetic Mean Method

AIP WGMM - Aggregation of Individual Priorities Weighted Geometric Mean Method

CPVP – Common Preference Vector Process

EDBAM – Euclidean Distance Based Aggregation Method

ADBAM – Aitchison Distance Based Aggregation Method

MAMCA – Multi Actor Multi-Criteria Analysis

FAHP – Fuzzy Analytic Hierarchy Process

IFN – Intuitive Fuzzy Number

IFWG – Intuitive Fuzzy Weighted Geometric Mean Operator

IFWA – Intuitive Fuzzy Weighted Arithmetic Mean Operator

1. Bevezetés

1.1. Motiváció

Jelen értekezés módszertanával, a többszemponútú döntéstámogató módszerekkel, és e körön belül is az Analytic Hierarchy Process (AHP) technikával 2005-ben kezdtem el foglalkozni kollégám és barátom, néhai dr. Bokor Zoltán javaslatára. Ph.D. értekezésemben egy átalakított AHP-modellt fejlesztettem ki logisztikai trendek előrejelzésére, ezt sikeresen, „summa cum laude” minősítéssel védtem meg 2008-ban. A védésen az elnöki teendőket a téma talán legnagyobb hazai módszertani szakértője, Prof. Dr. Rapcsák Tamás látta el, akitől a későbbiekben is sokat tanultam, egészen sajnálatos haláláig.

Közösségi közlekedés-fejlesztési döntésekre 2010-ben alakítottam ki egy AHP-modellt egy külföldi kutatómunka során, amelyre Prof. Dr. Tsutomou Mishina hívott meg a japán Akita Egyetemre, 3 hónapos MTA-JSPS ösztöndíj keretében. Együttműködésünk olyan sikeres volt, hogy még két alkalommal, ezután már az Akita Egyetem saját forrásából újra meghívtak, 2011-ben és 2012-ben.

Habilitációmát már ebben a témában védtem meg a Debreceni Egyetem Ihrig Károly doktori iskolájában 2013-ban.

2020-ban védett két Ph.D. hallgatóm közül az egyik, Sarbast Moslem is ezt a témát folytatta, ahogy a 2023 januárjában sikeresen védett Ahmad Alkharabsheh doktoranduszom is.

A 2020-ban elnyert MTA Bolyai ösztöndíjam központi témája szintén a csoportos döntéstámogatási többszemponútú módszerek használata a közlekedés-fejlesztés stratégiai döntéseinek leghatékonyabb segítése céljából. Ahogy az eddig elnyert (2020, 2021, 2022) három Új Nemzeti Kiválóság Program témái is (egyikük a fuzzy megközelítéssel egészíti ki, a másik a csoportos preferencia-vektorok új aggregálási módszerével, míg a harmadik a szimulációs esetek vizsgálatával) a 2010-ben elkezdett kutatás szorosan vett, a 2005-ben kezdettnek pedig a tágabb értelmű kiegészítéseinek tekinthetők.

Szakmai motivációm a közel két évtizedes kutatás elvégzésére az volt (és az máig), hogy a közösségi közlekedési fejlesztések preferenciájára használt eddigi nemzetközi modellek meggyőződésem szerint bizonyos pontokon javítandóak, azaz hatékonyabb módszertan kidolgozható a problémára. Egyrészt a felmérési folyamat hatékonyságát láttam javíthatónak, másrészt az egyéni preferenciák összegzését, valamint az egyes döntéshozói csoportok preferenciáinak súlyozását, ez utóbbit fuzzy környezetben is. Jelen MTA doktori értekezésem ezeken a pontokon célozza javítani a jelenleg nemzetközi szinten alkalmazott módszertani megoldásokat, és bizonyításokat is tartalmaz az általam kidolgozott új eljárások nagyobb hatékonyságára.

Kutatási témám a BME oktatásában, az Integrált Áruszállítási Rendszerek, illetve a Logisztikai Kontrolling című tárgyak egyes fejezeteiben is megjelenik.

1978-ban születtem Nyíregyházán, és a Budapesti Közgazdaságtudományi és Államigazgatási Egyetem elvégzése után a Nyíregyházi Főiskolán logisztika menedzsment jellegű tárgyak oktatásával bíztak meg, és az ott töltött 15 év alatt végigjártam az akadémiai lépcsőket főiskolai tanársegéd-től a főiskolai docensig. 2016-tól dolgozom a BME Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszékén, ez a váltás komoly kihívások elé állított mind az oktatási, mind a kutatási területen. A mostani MTA doktori értekezésem megírásának talán legfontosabb háttérét az a kutatói közösség adja, amely a BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karán és azon belül a tanszékemen fogadott.

Értekezésemben az elmúlt 16 év kutatási eredményeit összegeztem, amelynek alapját az ezalatt megjelent 116 publikációm adja. Ezek közül 42 külföldi folyóiratcikk, 4 hazai idegen nyelvű folyóiratcikk, és 16 hazai, magyar nyelvű tanulmány, 11 idegen nyelvű és 6 magyar nyelvű konferenciacikkkel kiegészítve.

Tudomány-metriámban 34 IF-os cikk szerepel, az MTA Műszaki Osztályának iránymutatása alapján kalkulált Q számom 51,483, amelyből 51,231 cikkekből származik. Összes független idézettségem (I szám) 702, ebből WoS-os 477, Hirsch-indexem a független hivatkozásokból 15. Összes impakt faktorom 116,659, egy szerzőre számított, relatív impakt faktorom 42,364.

A publikációs mennyiség mellett kiemelt figyelmet fordítottam a minőségre is, amit igazol 8 db Q1-es cikkem, amelyből 5 db D1 kategóriás is.

1.2. Az értekezés felépítése

Ezt az értekezést a Magyar Tudományos Akadémiának nyújtottam be a „Magyar Tudományos Akadémia Doktora” címére történő pályázatom részeként.

Az értekezés összefoglalja a Ph.D. cím megszerzése óta a közlekedésgazdasági területen végzett kutatási eredményeimet. Az eredményeket a 2.-es, a 3.-as, a 4-es és az 5-ös fejezetben mutatom be, majd a 6. fejezetben összefoglalom az új tudományos eredményeimet.

A 2. fejezet egy olyan, nemzetközi szinten is új több-szemponútú preferencia felmérésre vonatkozó modellt mutat be, amellyel hatékonyabban és kisebb költséggel lehet felmérni az utasok közlekedés-fejlesztésre vonatkozó preferenciáit.

A 3. fejezet egy szintén nemzetközileg is novumnak számító új preferencia-aggregálási eljárást prezentál, amely az extrém véleményekre kevésbé érzékenyen konstruál csoport-véleményt, ezáltal közösségi (utas, lakosság) konszenzust képes előállítani a közlekedés-fejlesztési igényekre vonatkozólag matematikai optimalizációs eszközökkel.

Különböző kitöltő-csoportok objektív vélemény-szintézisét mutatom be a 4. fejezetben, amely eltér az eddigi tudományos megoldásoktól, ugyanis a csoportok súlyát preferencia-vektorok távolság-minimalizálásával oldja meg, ezáltal hatékonyabban szintetizálhatja a közlekedési érdek-csoportok (utasok, fenntartó, közlekedési vállalat) fejlesztésre vonatkozó igényeit.

Végül az 5.-ös fejezetben a csoportos vélemény-szintézisnél figyelembe veszem a válaszadók esetleges bizonytalanságát, amely átvezet a fuzzy számok területére, és alkalmat ad arra, hogy a közlekedés-fejlesztés érintettjeinek valós igényét a felmérési folyamat bizonytalanságának csökkentésével is megkaphassuk, miközben ebben az esetben is vélemény-szintézisre törekszünk a csoportok között.

A 6. fejezet a nemzetközileg is új tudományos eredményeimet foglalja össze, valamint a kutatási eredmények várható hasznosítását taglalja.

1.3. Az értekezés előzménye

A közlekedési preferenciák felmérésének széleskörű, és több évtizedre visszanyúló szakirodalma van, amelyben összekapcsolódik a (közösségi) közlekedési rendszer egyes kínálati elemeivel való elégedettség felmérése, a direkt fejlesztési igényekre való rákérdezés felmérési metódusával. Fontos hangsúlyozni, hogy bár az egyes közlekedési szereplők célfüggvényei eltérőek (pl. a közlekedési vállalat versus utasok a költséghatékonyság versus maximális kiszolgálási színvonal esetében), mégis a különböző érintett csoportok preferenciáinak egyfajta konszenzusából kell, hogy kialakuljon a közlekedés-fejlesztési stratégia. Ezt célozza például a közlekedéstudományban jól ismert MAMCA (Multi-Actor Multi-Criteria Analysis) módszertan, amit Macharis és Bernardini (2015) fejlesztett ki és publikált. A következőkben a preferenciák felmérésének követelményeit veszem górcső alá.

Elsősorban a felmérésekben résztvevő válaszadói kör meghatározása lényeges. Értelemszerűen adott közösségi közlekedési rendszer felhasználói (De Gruyter et al, 2019, Krauss et al, 2022), esetlegesen potenciális felhasználói (Redman et al, 2013, Ho et al, 2020, Kim et al, 2021) kerülnek a mintába. Ajánlatos azonban kiterjeszteni a válaszadói kört (Hiahou et al, 2022) olyan érintett csoportokra (stakeholder-ek), amelyek egy rendszer-értékelési vagy fejlesztési döntésben jelentős szerepet játszhatnak, így legalább másik két csoport értékelése; a fenntartói (Keserű et al, 2021, Liang et al, 2021), valamint a működtetői (Floden, 2021, Huang, 2022) preferenciák is fontosak. Megjegyzem, lehetséges az is, hogy a kiemelt háromnál (utasok, állami fenntartó, közlekedési vállalat) több érdekcsoport is érintett, és ezeket is vizsgálni szeretnénk. Erre az esetre lehet példa, amikor a helyi és a központi fenntartó megkülönböztetése fontos (Ciardiello et al, 2021), vagy a környezetvédelmi szempontokat képviselő érdekcsoport is része a döntésnek (Gonzalez-Feliu et al, 2018), így négy, öt, vagy akár ennél is több kitöltői csoportot kell kezelni.

A minta kapcsán vizsgálni kell még a reprezentativitás kérdését, azaz a kellően nagy mintát, mint az elemzés eredményeinek kiterjeszthetőségét az érintett teljes sokaságra. Élesen külön kell választani a statisztikai jellegű módszereket (ezekről a következő alfejezetben teszek bővebben említést) a döntéstámogatási módszerektől. A statisztikai módszereknél jóval nagyobb minta szükséges (általában a teljes sokaság 1%-ánál is nagyobb, vagy a vizsgált kritériumokhoz képest sokszoros számú), mert az értékelési pontszámokat önmagukban álló adatoknak tekintik és így kerülnek analízisbe. Ezzel szemben a döntéstámogatási módszerek vizsgálják a logikai konzisztenciát a kitöltésekben, ezáltal kisebb, de jóval konzisztensebb adathalmazzal dolgoznak, valamint figyelembe kell venni a „wisdom of the crowd” jelenséget

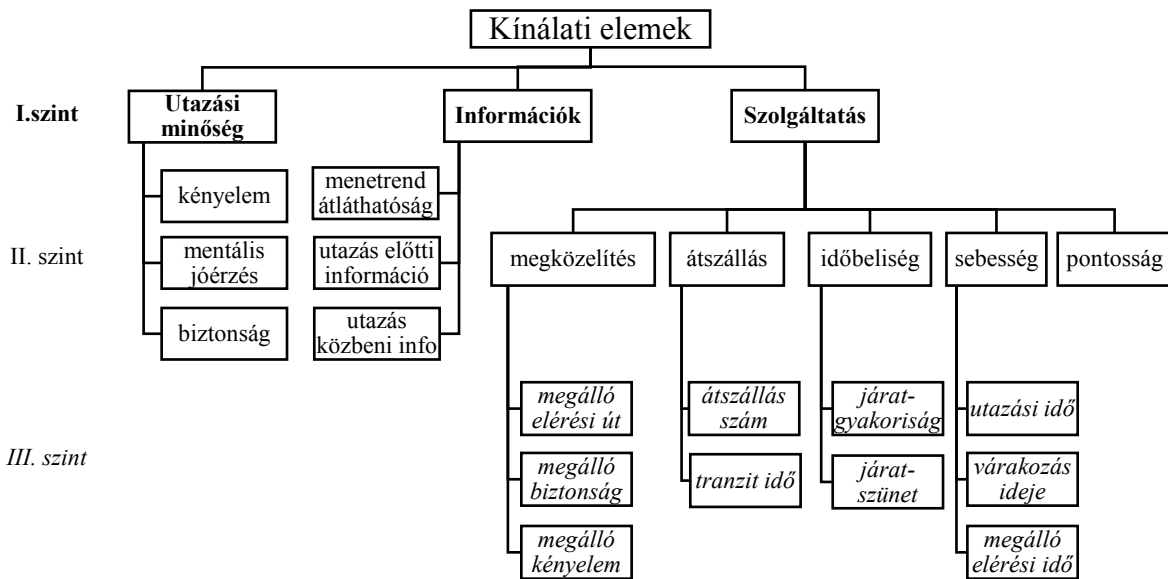
is ennél a megközelítésnél. A „tömeg bölcsessége” jelenség először Solomon-nál (2006) bukkan fel, de később számos kutatás verifikálta, többek között Lee et al, (2011) vagy Hosseini et al (2015). A jelenség lényege, hogy amennyiben döntési preferenciákat vizsgálunk, megfelelően nagy (hüvelykujj-szabály alapján 20 főnél nagyobb) random minta esetén a preferencia devianciák nincsenek már jelentős hatással a csoport összességének végleges preferenciájára (Frey és van de Rijt, 2021), azaz a 20 főnél nagyobb csoport „kellően bölcs”. Eddig megjelent publikációimban és a jelen disszertációmban is ezt a küszöbszámot jóval meghaladó mintákkal dolgoztam 40 kitöltőtől a több száz kitöltőig.

Szintén kardinális a közösségi közlekedési rendszer kínálati elemeinek a kiválasztása, hiszen ezek kerülnek be a preferenciális értékelésbe. A nemzetközi szakirodalomban leginkább domináns modellekben:

- az utazás biztonsága (Pedroso et al, 2018),
- az utazási idő (Ha et al, 2020),
- a megállók elérhetősége (De Vos et al, 2016),
- a menetrend betartása, vagyis a pontosság (Van Lierop, 2018),
- az utasok számára nyújtott információk (Thompson és Schofield, 2007),
- illetve a járművön való utazás kényelme és zsúfoltsága (Dell’Olio et al, 2011) szerepelnek.

Megfigyelhető azonban az, hogy még a vezető folyóiratok cikkeiben is egy-egy modellben viszonylag kisszámú kínálati elem szerepel, és túlnyomó részt mellérendelt szerepben, azaz hierarchikus struktúrát 2012-ig nem alkottak belőlük. A hierarchia általi halmaz-részhalmaz szerkezet sokkal áttekinthetőbbé teszi a kínálati elemeket és könnyebbé teszi az összehasonlíthatóságukat is, azaz a preferenciák kinyilvánítását.

Japánban töltött kutatómunkám során két japán kutatótársammal megalkottunk egy olyan hierarchikus modellt, amely három szinten integrálja a közösségi busz közlekedés kínálati elemeit, ezt a 2012-ben megjelent cikkünkben publikáltuk (Duleba et al, 2012), és az 1-es ábra mutatja be.



1. ábra: A közösségi buszközlekedés kínálati preferencia elemei (Duleba et al, 2012)

Ahogy látható az ábrán, a kínálati elemek halmaz-részhalmaz viszonyban vannak úgy, hogy az I-es szint a legáltalánosabb gyűjtőfogalmakból áll, a II-es szint specifikusabb, a III-as pedig a leginkább specifikus. A kritériumok három, jól elkülöníthető részre tagozódnak, amelyet az I-es szint mutat be: elkülönítettük a közlekedési járművön való tartózkodás elemeit (Utazási minőség) az információkkal kapcsolatos kritériumoktól (Információk), valamint a járművön utazást megelőző és követő, szolgáltatási jellegű elemektől (Szolgáltatás).

Néhány elem bővebb magyarázatra szorul a II-es és a III-as szinten. Az utazási minőségben belül a „kényelem” kritérium a fizikai érzést jelöli, ami az ülések komfortosságát, valamint a légkondicionálást, továbbá a járművön való zsúfoltságot foglalja magába hasonlóan Yaya et al (2015), illetve Imre és Celebi (2017) értelmezéséhez. A „mentális jóérzés” a sofőr udvariasságán túl az utas környezetvédelmi megfontolásait is tartalmazza, amely a közösségi közlekedés alacsonyabb szennyezési szintjének köszönhető, követve Saif et al, (2019) és Dong et al (2021) gondolkodását.

A III-as szinten a „megálló elérés” az utazás első megállójának és az otthonnak/munkahelynek távolságát jelzi, Curtis és Scheurer (2016) és Hawas et al (2016) értelmezésével egyetértve.

A közösségi busz közlekedés kritériumainak rövid magyarázatát mutatja az alábbi táblázat.

1. Táblázat: A hierarchikus döntési struktúrában szereplő közlekedési kínálati elemek értelmezése

Döntési elemek (kritériumok)	Döntési szint	Definíció
Utazási minőség	1.	A járművön töltött idő alatt felmerülő kínálati elemek

Információk	1.	Az utazás idejéről és helyszíneiről nyújtott információk
Szolgáltatás	1.	Minden szolgáltatás a járművön töltött idő előtt és után
Kényelem	2.	Ülőhelyek komfortja, zsúfoltság, légkondicionálás
Mentális jóérzés	2.	A sofőr és a többi utas viselkedése, környezetvédelmi megfontolások
Biztonság	2.	A járművön töltött időtartam alatti biztonság-érzet, sofőr vezetési stílusa, fenyegetettség
Menetrend átláthatóság	2.	A menetrendek és információk érthetősége az utasok számára
Utazás előtti információ	2.	Utazást megelőző információk mennyisége és minősége
Utazás közbeni információk	2.	A járművön tartózkodás alatti információ-nyújtás
Megközelítés	2.	A járatok eléréséhez kapcsolódó minden szolgáltatás
Átszállás	2.	Mennyire érhető el közvetlenül a célállomás (hány átszállás kell)
Időbeliség	2.	A járatok időbeli elérhetősége a teljes utazás alatt
Sebesség	2.	A teljes utazási folyamat gyorsasága
Pontosság	2.	A menetrend betartása, pontos érkezések, indulások
Megállók kényelme	3.	Tető, hűtés-fűtés, illetve az ülőhelyek kényelme a megállókban
Átszállás szám	3.	Hányszor kell átszállni a célállomásig az utasoknak
Tranzit idő	3.	Mennyi a várakozás a busz-busz, illetve a busz és bármely más járműre való átszállása kapcsán
Járat-gyakoriság	3.	Menetrendi és valós járat-gyakoriság
Járat-szünet	3.	Az utolsó esti járat és az első hajnali járat közötti idő
Utazás ideje	3.	A járművön töltött idő
Várakozási idő	3.	A kiválasztott járatra való várakozás
Megálló elérési idő	3.	Az induló állomás eléréséhez szükséges idő

Fontos kiemelni, hogy az 1-es ábrán bemutatott kritérium-rendszer hierarchikus, de nem szigorúan, vagyis az egyes elemek között van összefüggés a hierarchikus kapcsolatokon túl is. Például a nagyobb járat-sűrűség csökkentheti a várakozási időt, vagy a kisebb megteendő távolság az első megállóig rövidebb megálló-elérési időt jelenthet. Azonban ha a 24 elem összességét nézzük, megállapíthatjuk azt, hogy a nem-hierarchikus jellegű kapcsolódások jóval kevesebben vannak, illetve sokkal kevésbé determinisztikusak, mint a hierarchikus jellegűek. Következésképpen hierarchikus-alapú modellezés megfelelő becslést adhat különböző kitöltői csoportok preferenciáira.

A 24 kínálati elem nem tartalmazza a költség megfontolásokat, amelyek szintén fontos részei lehetnek a közösségi közlekedés használatának vagy adott rendszer fejlesztésének. Ahmad Alkharabsheh Ph.D. hallgatómmal dolgoztuk ki az 1-es ábrán bemutatott modell kiegészítését költség elemekkel: a viteldíjat az első szintre helyeztük, az alatta lévő második szinten pedig az

egy utazásra szóló menetjegyek árait, a bérletek árait, valamint az árkedvezményes jegyeket és bérleteket szerepeltettük.

Módosításokkal a modell alkalmazható más modalitású közlekedési rendszerekre vonatkozó preferenciák felmérésére, vasútra a legegyszerűbb példák Espinosa-Aranda et al (2015), valamint Torabi et al (2022). A légi közlekedés utas preferenciáinak felmérésére O'Connel és Warnock-Smith (2013), valamint Roman és Martin (2014) kutatásai a legjobb példák, amelyek hasonlóan közelítik meg az utas elégedettség kritériumait, mint az 1-es ábrán látható. Különösen a kényelem és a biztonság szempontjából közelített az utasok igényeihez Marquez et al, (2014) a belvízi hajózást választók esetében. Szintén a strukturált preferenciák logikája mentén kutatott a londoni metróhálózat igénybevevői között Bansal et al (2022), valamint a preferenciák változásait vizsgálta a COVID-19 járvány után.

Hazai példákat is találunk az utas preferenciák hierarchikus szemléletben történő vizsgálatára, Esztergár-Kiss és Csiszár (2016) internetes utazástervező rendszerek értékelési szempontjait elemezte több utas csoporton, kérdőíves felmérés alapján. Földes és Csiszár (2016)-ban pedig a személyre szabott utazástervezés során az eltérő egyéni preferenciákat hangsúlyozták kutatásukban. Nagy et al (2018) az intermodális csomópontok kialakítási igénye kapcsán vizsgálta a potenciális felhasználók preferenciáit. Elsősorban az energia-felhasználás és klímaváltozás szempontjait (az 1-es ábrán a mentális jóérzés kritériumához tartozik) kutatta a közúti közlekedésben Tánczos és Török (2007), ahol kiemelték, hogy lényeges a közlekedési rendszerek tervezésénél és fejlesztésénél figyelembe venni a lehető leghatékonyabban felmért felhasználói igényeket. A közlekedési infrastruktúra több kritériumot felhasználó analízisét pedig már 2003-ban elvégezte Békefi et al (2003) kutatócsoportja a magyarországi beruházásokra.

Ahogy ebből a rövid áttekintésből is látható, a téma számos kutatót foglalkoztat nemzetközi és hazai szinten egyaránt. Doktori értekezésemben ehhez a meglévő tudáshoz próbálok hozzájárulni az elmúlt években folytatott kutatómunkám alapján.

Az 1-es ábra mutatja azt az alapmodellt, amelyre jelen MTA doktori értekezésem négy tézisét felépítem. Ennek a hierarchikus preferencia-rendszernek az egyre szofisztikáltabb módszertannal való társítása meggyőződésem szerint az utas preferenciák összegyűjtésének és elemzésének hatékonyabb megvalósítását teszi lehetővé.

Amennyiben a kitöltői minta és a modellben szereplő kritériumok megállapításra kerültek, a megfelelő módszertan kiválasztása, valamint kidolgozása teszi teljessé az adott kutatást. A következő alfejezetben röviden kitérek a versengő módszerekre is, de részletesebben a kiválasztott alapszert mutatom be.

1.4. Alkalmazott módszerek és eljárások

Ahogy az előző alfejezetben is említésre került, a közlekedési preferenciák kutatásában alapvetően két versengő módszer-család domináns: a statisztikai alapú módszerek, valamint a döntéstámogatás megközelítésű modellek.

A statisztikai alapú módszereknél a leginkább alkalmazott az úgynevezett Discrete Choice Modelling (DCM) eljárás (Chirillo és Xu, 2011; Paneque et al, 2021), amely reprezentativitásra törekszik megfelelően rétegzett mintavétellel és nagyszámú kitöltéssel. Bár kétségtelenül matematikailag megalapozott metódus, hátránya mégis az, hogy a megkapott értékeléseket adatoknak fogadja el anélkül, hogy a kitöltés konzisztenciáját vizsgálná. Következésképpen sokszor előfordulnak megmagyarázhatatlan „zajok” (De Ona és De Ona, 2015), amelyek torzíthatják, esetenként egyenesen lehetetlenné teszik a végkövetkeztetések levonását.

Ezzel szemben a másik eljárás-család a többszemponú döntési elemzés (multi-criteria decision analysis, MCDA) módszerek kisebb mintával dolgoznak, de konzisztencia alapján megszürik a válaszokat és a válaszadókat. Egyszerű belátni, hogy egy DCM felmérésnél adott kitöltő értékelheti „A” kritériumot sokkal fontosabbnak „B”-nél és „B”-t „C”-nél, de a kérdőívben „C”-t fontosabbnak „A”-tól is egyidejűleg, ami logikai ellentmondás. Ez a DCM modelleknél zajként jelentkezik. A többszemponú módszereknél, és kifejezetten a kiválasztott Analytic Hierarchy Process (AHP) esetében viszont a nem megfelelően konzisztens válaszok be sem kerülnek az elemzésbe, azaz nem torzítyják a végeredményt.

Az MCDA módszer-családon belül számos technikát különböztetünk meg, ezek közül a legfontosabbak:

- Analytic Hierarchy Process (AHP, Saaty, 1977),
- Analytic Network Process (ANP, Saaty, 1996),
- Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS, Lai et al, 1994),
- Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE, Brans et al, 1986)
- Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE, Roy, 1990)
- Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART, Edwards, 1971, Barron és Barrett, 1996)
- Best-Worst Method (BWM, Rezaei, 2015)

A technikák részletes összehasonlító elemzése túlmutat ezen értekezés keretein, azonban fontos megindokolni, hogy a cél, vagyis a közösségi közlekedés preferenciáinak felmérése és elemzése érdekében miért az AHP-t választottam.

Az első érvem, hogy a teljes MCDA módszertanból az AHP a leginkább alkalmazott. Az értekezés írásának időpontjában 778.000 Google Scholar hivatkozás található rá, 30300 csak az utolsó két évből, és jellemzően top (Q1, D1) folyóiratokban.

Még lényegesebb a kutatás szempontjából, hogy a közlekedéstudományokban az AHP egyértelműen a leginkább domináns MCDA technika (Nalmpantis et al, 2019).

Másik fontos érv a kiválasztott módszer mellett, hogy a kritériumok hierarchikus szerkezete jelentősen megkönnyíti a kritériumok értelmezhetőségét a kitöltők számára, ez pedig különösen hasznos a nem-szakértő kitöltők esetében, például utas preferenciák gyűjtésénél és elemzésénél. A halmaz-részhalmaz elem-viszony ugyanis közvetlen értelmezési keretet ad az egyes kínálati elemeknek a közlekedési szolgáltatásban (ahogy az az 1-es ábrán is látható).

Korábban már utaltam arra, hogy az AHP-ben kap a legnagyobb szerepet a kitöltések konzisztenciájának vizsgálata, vagyis, hogy kellőképpen tranzitív-e az értékelés az egyes válaszadóknál, illetve a minta egészén, mint csoportnál. Ez az immanens jellegű ellenőrzés pedig erősíti a válaszokból levont következtetések megbízhatóságát.

A felsorolt három pilléren nyugszik a módszer kiválasztása a közösségi közlekedési preferenciák kutatásához. Az alábbiakban az AHP rövid bemutatása következik Saaty 1980-ban megjelent könyvének értelmező összefoglalásaként.

Ahogy az 1-es ábrán specifikusan a közlekedési kínálati elemek esetében már láthattuk, minden AHP eljárás egy döntési probléma kritériumainak hierarchikus döntési struktúrába rendezésével kezdődik. A modellben lehetnek kritériumok, al-kritériumok, al-al-kritériumok, és így tovább, tetszőleges számú döntési szintig. Természetesen meg kell jegyezni, hogy minél több döntési szintből és minél több kritériumból álló problémát vizsgálunk, a szükséges páronkénti összehasonlítások száma annál inkább növekszik, ami nehézkessé teszi a kitöltést és veszélyezteti a konzisztenciát. A legalsó szint mindig az alternatíváké (ha vannak, disszertációmban, alapesetben és három tézisben nincsenek), vagyis a lehetséges választásoké, közlekedés-fejlesztés esetén ez lehet a rendelkezésre álló forrásokból megvalósítható fejlesztési projektek megnevezése, erről bővebben a negyedik tézisben írok. Fontos, hogy melyik elemet hová soroljuk be, hiszen ez egyrészt meghatározza a páros összehasonlításokat – csak azonos szinten lévő elemeket hasonlíthatunk össze – másrészt a végső súlypontoszámokat is befolyásolja.

Tegyük fel, hogy a darab alternatívánk van egy döntési feladatban: A_1, A_2, \dots, A_a , és m darab kritériumunk C_1, C_2, \dots, C_m amelyek alapján választhatunk az alternatívák közül! Jelöljük $\mathbf{A}^{(i)}$ -vel az alternatívák páros összehasonlítási mátrixát az i -edik kritérium szerint, és $v^{(i)}$ -vel azt a sajátvektort, amit az $\mathbf{A}^{(i)}$ mátrixból számítottunk ki Saaty sajátvektor eljárásával! (Más matematikai módszerek is rendelkezésre állnak a sajátvektor előállítására, de terjedelmi korlátok miatt ezekre nem térek ki.) Alkossuk meg a kritériumok páros összehasonlításából a \mathbf{C} mátrixot, és jelölje $w^{(c)}$ azt a súlyvektort, amit a \mathbf{C} páros összehasonlítási mátrixból számítottunk ki a sajátvektor eljárással! Az alternatívák végső értékelési pontszámait ($u(w)$) így az alábbi képlettel határozhatjuk meg:

$$(1.1) \quad u(w) = v_1^{(c)} w^1 + v_2^{(c)} w^2 + \dots + v_m^{(c)} w^m$$

A módszer tehát először a releváns elemeket páros összehasonlítási mátrixokba rendezi, majd a sajátvektor meghatározása által súlypontoszámokat számol mind az alternatívákra, mind a kritériumokra.

A páros összehasonlítási mátrixok quadratikus, reciprok mátrixok, amelyek szerkezete teoretikus esetben, azaz tökéletes konzisztencia esetén a következő (q db kritérium, vagy alternatíva esetén):

2. Táblázat: A $q \times q$ konzisztens, teoretikus páros összehasonlítási mátrix szerkezete

$\frac{w^1}{w^1}$	$\frac{w^1}{w^2}$	$\frac{w^1}{w^q}$
$\frac{w^2}{w^1}$	$\frac{w^2}{w^2}$
...
...
$\frac{w^q}{w^1}$	$\frac{w^q}{w^2}$	$\frac{w^q}{w^q}$

Látható az 2-es táblázatból, hogy q összehasonlítandó elem esetén a páros összehasonlítási mátrix főátlójában 1-esek szerepelnek, hiszen ez minden elem saját magával való összehasonlítását jelenti. Az összes többi elem a főátlóra szimmetrikusan reciprok ($a_{ij}=1/a_{ji}$), valamint, hogy minden mátrix elem egy arányt reprezentál. Könnyen belátható, hogy a mátrix elemek tökéletesen tranzitívak, azaz $a_{ik}=a_{ij}a_{jk}$, minden i, j és k -ra a mátrixban.

Ez a teoretikus eset vezette Saaty-t a sajátvektor-módszer megalkotására, hiszen egyértelmű, hogy az 1-es táblázatban látható mátrix sajátvektora $\{w^1; w^2; w^3; w^4; \dots; w^q\}$, legnagyobb sajátértéke, pedig q . A sajátvektor-módszer pedig a következő egyszerű egyenlet által leírható (folytatva az 1.1.-es képlet jelöléseit C -re és $A^{(i)}$ -re):

$$(1.2.) \mathbf{A}^i v^i = \lambda_{\max} v^i$$

$$(1.3.) (\mathbf{A}^i - \lambda_{\max} \mathbf{I}) v^i = 0$$

ahol λ_{\max} az \mathbf{A}^i mátrix legnagyobb sajátértékét jelöli.

Preferenciák felmérése esetén azonban nem teoretikus páros összehasonlítási mátrixokat kapunk, hanem úgynevezett tapasztalati mátrixokat, amelyekre nagy valószínűséggel nem igaz, hogy a kitöltők a fent leírt tökéletes konzisztenciával töltötték ki azokat. Az AHP eljárásban ugyanis a kitöltők egy skála alapján becsléseket adnak a mátrixok w_i/w_j elemeire saját preferenciájuk kifejezéséként. A skála 1-től 9-ig terjed a semlegestől az abszolút fontosabb 9-es értékig, valamint ezek reciprok értékei fejezik ki a fontossági alárendeltséget, azaz 1-től 1/9-ig terjednek a másik reláció irányba. Az 1/8 és az 1/9 jelentős alárendeltséget fejez ki.

Saaty javaslata azonban az, hogy ezeknél a tapasztalati mátrixoknál is az (1.2.) és (1.3.) egyenleteket használjuk, de úgy, hogy vezessünk be egy konzisztencia-küszöböt, amely „elégge konzisztensséget” jelent a szűrőn átjutott elemekre, míg a kisebb konzisztenciát elérő kitöltések kiszűrésre kerülnek, és nem alkotják a végeredményt, azaz a súlyszámokat és az alternatíva pontszámokat. Természetesen, ehhez egy konzisztencia-mérő eljárást is megalkotott, amely a konzisztencia-hányados (Consistency Ratio, CR) értékében végződik. Ezt az alábbi két lépésben lehet meghatározni:

$$(1.4.) CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$$

$$(1.5.) CR = CI / RI$$

ahol n a páros összehasonlítási mátrix sorainak vagy oszlopainak a száma, vagyis nagysága, RI pedig egy úgynevezett Random Index, amelyet adott nagyságú random generált mátrixok konzisztenciájának vizsgálatával állapított meg a következő eredménnyel (3. Táblázat):

3. Táblázat: A Random Index (RI) értékei a random módon generált mátrixok esetében különböző mátrix nagyságoknál

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

Világos, hogy egy 2x2-es páros összehasonlítási mátrix minden esetben konzisztens, hiszen nincs tranzitivitás, amit vizsgálni kellene, bármelyik beírt érték megfelelő. Ezen túl az is belátható, hogy az RI mértékének egyre növekvőnek kell lennie a dimenzió-szám növekedésével, hiszen egyre kisebb a valószínűsége, hogy random generált mátrix megfelelően konzisztens lesz a mátrix-nagyság növelésével.

Az AHP eljárásban a $CR < 0,1$ hányadosú kitöltéseket fogadjuk el, esetenként, főleg nem-szakértő értékeléseknél és nagy dimenziójú mátrixok esetében a 0,2-es küszöbszám is elfogadható.

A szűrésen átesett kitöltéseket (a leggyakrabban csoportos AHP-re készítünk modellt, azaz több kitöltő együttes preferenciáit szeretnénk meghatározni) aggregálni kell, erről bővebben a 2-es tételben írok. Itt a bevezetésben a klasszikus aggregálási eljárást mutatom be, ahol a megfelelően konzisztens egyéni kitöltött mátrixokat a megfelelően megjelölt mátrix értékek geometriai átlagértékének számításával aggregáljuk, és így egy aggregált mátrixot konstruálunk a csoportra.

$$(1.6.) f(x_1, x_2, \dots, x_h) = \sqrt[h]{\prod_{d=1}^h x_d}$$

ahol az x_1, x_2, \dots, x_h az egyéni páros összehasonlítási mátrixok ugyanolyan pozíciójú elemeit jelenti, d pedig adott kitöltőt, h számú kitöltő esetén: $d=1, 2, \dots, h$.

Az aggregált páros összehasonlítási mátrixra aztán a sajátvektor-módszer (1.2.) és (1.3.) képleteit alkalmazzuk, végül pedig az (1.1.) képlettel kiszámoljuk a kritériumok és alternatívák végső pontszámát.

Ez tehát az az AHP alapmodell, amelyet közel öt évtizede alkalmaznak különböző műszaki és menedzsment problémákra.

Az alfejezet úgy teljes, ha megemlítem azokat a hazai kutatókat, akik jelentősen hozzájárultak az AHP elméleti és gyakorlati fejlesztéséhez és alkalmazásához. Elsőként mindenképp Rapcsák Tamás professzort kell említeni, aki többek között az egyéni értékelések csoport rangsorolássá szintetizálását (Gass és Rapcsák, 1998) kutatta. Tanítványa Bozóki Sándor a nem teljesen kitöltött páros összehasonlítási mátrixok teljessé tételét (Bozóki et al, 2010), illetve a sajátvektor módszertől eltérő, legkisebb négyzetek elvén alapuló (Bozóki 2008) sajátvektor meghatározást vizsgálja. Farkas András a sajátvektor módszer alkalmazása esetén bekövetkező esetleges rangsor-fordulási elméleti és gyakorlati példákat elemezte (Farkas, 2007). Csató László elsősorban a páros összehasonlítások alapján történő rangsorolások hatékonyságát kutatja (Csató, 2013).

A disszertációm következő négy tézisében azt mutatom be, hogy a közösségi közlekedési preferenciák felmérése során milyen hiátusokat találtam a módszerben és hogyan fejlesztettem tovább abból a célból, hogy még inkább alkalmas legyen csoportos közlekedési preferenciák felmérésére, elemzésére és olyan konszenzusos vélemény kialakítására, amely hozzájárul a hatékonyabb fejlesztési döntéshozatalhoz.

2. Tetszőleges hierarchia-szinten lévő közlekedési preferenciák új, hatékonyabb felmérése: egy Parsimonious AHP-modell a közlekedés-fejlesztési preferenciákra

2.1. Az AHP egyik hátránya

Sorozatos, nagyszámú páros összehasonlítások – kiváltképp, ha azokat elvárt konzisztenciával kell megtenni – jelentős erőfeszítést igényelnek a kitöltőktől. Ennek következménye lehet a megnövekedett felmérési idő és ezáltal költség, az instruktorok használatának szükségessége a felmérés során, valamint a nem kellően átgondolt, megbízhatatlan kitöltés. Elsősorban a jelenség a nem-szakértői felmérésekre jellemző, de belátható, hogy a szakértői minta esetében is fennállhat. A disszertációm tárgyát jelentő közösségi közlekedés-fejlesztési preferenciáknál mindenképpen fontos tényező az igényelt kitöltői erőfeszítés leginkább az utas-csoport felmérésnél, de releváns lehet a fenntartói és üzemeltetői szakértők lekérdezésében is.

Az AHP egyik hátrányaként említik, hogy a modellekben már viszonylag kisszámú kritériumoknál és alternatíváknál is elég jelentős páros összehasonlításra van szükség a végső pontszámok megállapításához. Ha az 1-es ábrán szereplő alapmodellt tekintjük, úgy is, hogy a reciprocitás miatt csak a főátló fölötti elemeket töltjük ki, a 24 elem ilyen hierarchikus szerkezetben meglehetősen sok értékelést jelent. Szükség van ugyanis:

- 3 páros összehasonlításra az első szinten
- 3+3+10 páros összehasonlításra a második szinten
- 3+1+1+3 páros összehasonlításra a harmadik szinten

Következésképp alternatívák nélkül is a közlekedés-fejlesztési AHP-modell 27 páros összehasonlítást igényel, úgy, hogy a második szinten az egyik mátrix 5x5-ös méretű, amely megfelelő konzisztenciával viszonylag nehezen tölthető ki. A feladat és a szempontok megértésén túl az értékelő pontszámok kigondolása és a tranzitivitás (remélhető) random ellenőrzése együttesen 30-45 percet is igénybe vehet, amely jócskán túlnyúlik a válaszadásra szánt kitöltői időn, elsősorban az utasok csoportja esetében.

A szakirodalom évtizedeken keresztül próbált megfelelő választ találni a páros összehasonlítások számának lehetséges csökkentésére az AHP-ben.

Egyik figyelemre méltó megközelítés Ishizakáé (Ishizaka, 2012a), aki az elemek klaszterekbe rendezését javasolta, úgy, hogy minden döntési elem csoportnak legyen egy közös eleme (ami képviselné adott klasztert) egy másik csoporttal, így nem kellene összehasonlítani egy külön mátrixban az összes klaszter elemet. Ennél a módszernél viszont még mindig túl nagyoknak találta a szükséges összehasonlítások számát.

Másik lehetőség vizsgálni a nem teljesen kitöltött páros összehasonlítási mátrixok tulajdonságait (Bozóki et al, 2010, Chen et al, 2015, Szádóczki et al, 2022). Szempontunkból azért nem megoldás ez a megközelítés, mert a közlekedési preferencia felmérésnél előre (ex-

ante) szeretnénk csökkenteni az igényelt összehasonlítások számát, nem pedig a hiányosan értékelt mátrixokat akarjuk utólag (ex-post) kiegészíteni a konzisztencia kritérium alapján.

A harmadik út a probléma enyhítésére valamilyen „benchmark”, vagyis viszonyítási pont használata, amihez viszonyítjuk az összes többi elemet, és ez a viszony meghatározza azok egymáshoz való viszonyát is. Erre két alapvető megoldás született: az AHPSort (Ishizaka et al, 2012b) és a Best-Worst Method (Rezaei, 2015). Mindkét módszertannál kérdéses a benchmark meghatározása, valamint a páros összehasonlítások korlátozott csökkentésének lehetősége is, elsősorban nagyszámú kritérium vagy alternatíva esetén, ugyanis $2n-3$ összehasonlításra mindenképp szükség van ezeknél a modelleknél ($n-1$ a legjobb elemhez, $n-1$ a legrosszabbhoz, valamint 1 a legjobb és legrosszabb összehasonlításához).

2019-ben Abastante et al dolgozott ki egy olyan módszertant, amely hatékonyan képes kezelni az összes fent említett problémát és még a lekérdezés előtt jelentősen redukálja a szükséges páros összehasonlítások számát. A módszert Parsimonious AHP-nek (PAHP) nevezték el, amit szabad fordításban takarékos AHP-nek címkézhetnénk magyarul, utalva a kisebb igényelt kitöltői erőfeszítésre.

2.2. Egy lehetséges megoldás az összehasonlítások redukciójára: a PAHP

A PAHP lényege, hogy a döntési hierarchia legalsó (vagy egyetlen) szintjén lévő n alternatívát először direkt módon pontozzuk (1-100-as skálán), majd kiválasztunk közülünk az n -nel arányos számú referencia-elemet, amelyet páros összehasonlítási mátrixban értékelünk (az AHP módján), majd pedig az összes elemre lineárisan interpoláljuk az eredményeket. Vegyük észre, hogy a konzisztencia-mérés bár kisebb mértékben, de megmaradt az AHP-ből, csakúgy, mint egy meghatározott lépésben a páros összehasonlítás! Ráadásul a kidolgozott eljárásban a kitöltőknek a páros összehasonlítási fázis után lehetőségük van módosítani a skála értékeléseket, valamint a páros összehasonlítás értékeit is a súlypontoszám ismeretében. A szerzők azt is bebizonyították, hogy a PAHP-ben elkerülhető a rangsor-fordulás, amely az AHP egyik kockázata. A módszerrel valóban drasztikusan csökken a szükséges páros összehasonlítások száma, hiszen az a referencia pontok számától függ, amely az összes elem hüvelykujj-szabály szerinti töredéke (érdekesség, hogy a mai napig nem született egzakt eljárás a referencia-pontok szükséges számára). A tanulmányban egy illusztratív példát is találunk: 98 egyetemi hallgatóval becsültették meg különböző geometriai alakzatok területét, és mind az AHP, mind a PAHP igen hatékonynak bizonyult, mint döntéstámogató eljárás.

Az általános PAHP modell C_m kritériumra és a alternatívára, a módszer kitalálói, Abastante et al (2018) alapján a következő 6 lépésben összegezhető:

1. Értékeljük közvetlenül a modellben lévő C_m kritériumokat minden egyes megfelelő a alternatívára egy egyszerű skálán (például 0-100);
2. Válasszunk ki néhány (a számot, ahogy már előbb taglaltam, nem határozták meg egzakt formulával) referencia-kritériumot, és jelöljük ezeket a kritériumokat s -sel, a referencia-kritériumok száma pedig legyen t_m ;

3. Corrente et al. (2016) megközelítését követve, kérjük meg az értékelőket, hogy az eredeti AHP szerint végezzenek páros összehasonlításokat a referencia-kritériumokon. Jelöljük γ_{ms} -sel az s referencia-elem direkt pontszámait, amelyeket az első lépésben kaptak, az AHP által nyert – a módszer miatt biztosan 1-re normált - súlyvektor értékeit pedig jelöljük $u(\gamma_{ms})$ -sel, minden $m = 1, \dots, n$ -re és minden $s = 1, \dots, t_m$ -re;
4. A következő ellenőrzési mechanizmusokat, illetve az értékelőkkel történő egyeztetéseket végezzük el:

- az AHP fázisban született értékelések konzisztenciáját a hagyományos, Saaty-féle módon ellenőrizzük, ahogy korábban már bemutattam a disszertációban (CR),
- a saját-vektor módszer által kapott normált értékeket $u(\gamma_{ms})$, minden $m = 1, \dots, n$ és minden $s = 1, \dots, t_m$ esetében hasonlítsuk össze a megfelelő értékelésekkel $r_m(\gamma_{ms})$ ügyelve a monotonitás teljesülésére, azaz teljesülnie kell, hogy: $r_m(\gamma_{ms1}) > r_m(\gamma_{ms2})$ ha $u(\gamma_{ms1}) \geq u(\gamma_{ms2})$,
- az értékelőknek biztosítani kell azt a lehetőséget, hogy módosítsanak az AHP szakaszban adott pontszámaikon, ha nem megfelelő konzisztenciával töltötték ki eredetileg a páros összehasonlítási mátrixot, vagy ha nem teljesül az előző pontban említett monotonitási feltétel.

5. Az elem-sorrend és a végsőpontszámok azon elemek esetében, amelyek nem kerültek kiválasztásra referenciának lineáris interpoláció által kerülnek megállapításra. Jelöljük:

$u(r_m(a))$ -val a normált végső pontszámát az (m) kritériumnak az (a) alternatíva tekintetében, amelyhez felhasználjuk az előző lépésekben megkapott normált AHP értékeket

$u(\gamma_{ms})$ a normált AHP súlypontszám a kiválasztott s referencia elemre, amelyet a páros összehasonlításokból a saját-vektor módszer lefolytatása által nyertünk,

$u(\gamma_{ms+1})$ a normált AHP súlypontszám az $s+1$ referencia elemre, amelyet a saját-vektor módszer által nyertünk,

γ_{ms} legyen az s referencia elem direkt pontszáma (amit az 1-es lépésben a közvetlen értékelés által, a 0-100-as skálán nyertünk, de normálva),

γ_{ms+1} pedig az $s+1$ referencia elem normált direkt pontszáma,

$r_m(a)$ jelölje a közvetlen értékelői pontszámot az adott kritériumra az a alternatíva tekintetében.

Minden $r_m(a) \in [\gamma_{ms}, \gamma_{ms+1}]$ -ra a következő értéket számítjuk ki (ezáltal a rangsorfordulást maximális biztonsággal el tudjuk kerülni, ahogy korábban említettem is a módszer erényei között):

$$(2.1.) u(r_m(a)) = u(\gamma_{ms}) + \frac{u(\gamma_{ms+1}) - u(\gamma_{ms})}{\gamma_{ms+1} - \gamma_{ms}} (r_m(a) - \gamma_{ms}).$$

A Parsimonious AHP-ben tehát már a legelső lépésben meghatározunk egy monoton növekvő kritérium-sorrendet, amelyet a közvetlen értékelések alapján kapunk (természetesen csoportos értékeléseknél ez egy számított átlag-pontszám az egyes kritériumokra). Ebből a sorból kiválasztunk t_m referencia-elemet, amelyekre elvégezzük a páros összehasonlításokat, csakúgy, mint az AHP-ben és aszerint ellenőrizzük is a konzisztenciát, valamint azt a monotonitást, amely az első lépés értékeléseiből adódik. Ezután a saját-vektor módszer alapján kiszámított súlypontszámokat kicseréljük a referencia-elemek direkt pontszámaival és visszatérünk az eredeti monoton növekvő kritérium-sorrendhez. Ebben a sorrendben bármely r_j elem normalizált végső pontszámát úgy kapjuk meg, hogy megkeressük azt a két referencia-elemet, amelyek közül az egyik a kisebb (γ_{ms}), a másik a nagyobb (γ_{ms+1}) szomszédja, azaz legközelebb esik hozzá a monoton növekvő sorrendben. Ezután alkalmazzuk rá a (2.1.) formulát, hogy megkapjuk a végső pontszámát, a rangsor-fordulás ezáltal pedig kizárt.

Ez tehát az eredeti Parsimonious-modell, a következő alfejezetben pedig bemutatom saját hozzájárulásom a módszertanhoz a többszintű PAHP megalkotásával.

2.3. A közlekedési felmérésekre javasolt többszintű Parsimonious AHP modell bemutatása

Az előző alfejezetben ismertetett modell bár még mindig frissnek tekinthető, jelentős pozitív visszhangot kapott, részben amiatt is, hogy megalkotói a terület nemzetközi szinten is igen elismert képviselői.

Nem jelent meg azonban kritika a módszertannal szemben, pedig véleményem szerint két hiányossága is volt az eredeti tanulmánynak. Egyrészt nem vette figyelembe az AHP egyik jellemző sajátosságát, azaz, hogy legtöbbször több szintű hierarchiáról beszélünk a kritériumok esetében, másodsor pedig nem hasonlította össze a PAHP eredményeit más, AHP-n belüli eltérő módszertannal, de ugyanarra a problémára megkapott eredményekkel.

Kutatásaimban mindkét hiányosságot igyekeztem orvosolni. Az elsőhöz meg kellett alkotnom a többszintű Parsimonious AHP általános modelljét.

Tegyük fel, hogy egy döntési problémánál van m kritériumunk, amelyeket l különböző döntési szinten rendezünk el (az 1. ábrán lévő közlekedés-fejlesztési problémánál például három szinten helyezkednek el a kritériumok). Tehát van $k = 1, \dots, l$ döntési szintünk, $k \in K$, és az m kritérium l szintre lett elosztva. Csakúgy, mint a közlekedés-fejlesztési problémánál, itt sem használtam

(még) alternatívákat, tehát csakis kritérium-szintekről beszélünk, de azokból több van, a többszintű PAHP modellben tetszőleges számú. Célunk tehát az összes kritérium súlypontszámának a megállapítása, de nem a hagyományos AHP eljárással, hanem az új, többszintű PAHP modellel.

Jelöljünk p -vel valamely kritériumot egy adott szinten, tehát c_{kp} bármely döntési szinten lévő kritériumot jelöli, mégpedig ha egy szinten g kritériumunk van, és összesen m kritériumunk, akkor, $p=1, \dots, g$, $p \in M$ és M a halmaza az összes döntésben szereplő kritériumnak, így $M = 1, \dots, m$. Következésképpen, c_{kp} jelöli a p -edik kritériumot a k -edik döntési szinten, így például c_{11} a döntési fa (hierarchia) első kritériuma az első döntési szinten.

Az általam javasolt módszer első lépése annak a döntési szintnek vagy szinteknek a kiválasztása, amelyre alkalmazni fogjuk a Parsimonious AHP-t. Ez persze lehet az összes döntési szint is, de az AHP modellek túlnyomó többségében csak egy vagy két szintre jellemző a sok kritérium jelenléte. Meglátásom szerint olyan döntési szint(ek)re érdemes alkalmazni a PAHP-t, ahol $g \geq 9$, ugyanis ekkor lehet érdemes enyhíteni a kitöltés által követelt szellemi erőfeszítésen. Ezen felül, követve Saaty ajánlását a maximális páros összehasonlító mátrix méretével kapcsolatban (Saty, 1977), amely 7 ± 2 kritériumot enged meg egy mátrixra maximum az emberi elme teljesítőképessége alapján, olyan döntési szintet javaslok PAHP-ra, amelynél 5×5 -ös, vagy ennél nagyobb mátrix elkerülhető, kiváltható. Saját tapasztalatom alapján is kijelenthető, hogy az 5×5 -ös mátrix már nagy nehézséget okozott, elsősorban a nem-szakértő kitöltők számára.

Második lépésként a kiválasztott döntési szint(ek) c_{kp} elemeire közvetlen értékelést kérünk a kitöltőktől a már ismert 0-tól 100-ig tartó intervallum értékeiből. Fontos megjegyezni, hogy ekkor az eredeti döntési fa struktúra már szétbontásra kerül (vagyis az elemek kapcsolódásait nem vesszük figyelembe), annak a visszaállítása csak a módszer egy későbbi fázisában történik meg.

Aztán követve Abastante et al, 2018 ajánlását az eredeti PAHP szerint, s referencia elemet kiválasztunk az adott szint(ek)en, a k -n.

Ezután a referencia-elemeken elvégeztetjük az eredeti AHP páros összehasonlításokat a kitöltőkkel. Ezáltal megkapjuk a szinten lévő s referencia-kritériumok sajátvektor módszerrel előállított, normált súlypontszámait: $u(c_{ks})$, minden $s = 1, \dots, t_p$ -re.

Az eredeti PAHP módszer alapján ellenőrizzük a páros összehasonlítások konzisztenciáját, valamint az egymással és a direkt értékelésekkel való monotonitását, és lehetőséget adunk kitöltői korrekcióra, ha szükséges.

Az összes kritérium végső pontszámának kiszámításánál azonban módosítanom kellett a képletet, hiszen esetünkben nincs szó alternatívákhoz kötődő kritériumokról, mert a módszer

lényege a tetszőleges döntési szintre való alkalmazás. Így adott szinten minden kritériumra (c_{kp}) ezt a képletet alkalmazzuk:

$$(2.2) u(c_{kp}) = u(c_{ke}) + \frac{u(c_{ke+1}) - u(c_{ke})}{\gamma_{ke+1} - \gamma_{ke}} (r_{kp} - \gamma_{ke}).$$

A (2.2.) képletben $e = 1, \dots, t_p$ és c_{kp} fontossági pontszáma két referencia-kritérium közé esik c_{ke} és c_{ke+1} közé, így $r_{ke} < r_{kp} < r_{ke+1}$. Ha megkaptuk a Parsimonious szint(ek) pontszámait, vissza kell állítanunk a döntési struktúrát, hogy megkaphassuk az egész probléma végső súlypontszámait és alternatíva pontszámait. Következésképpen minden $u(c_{kp})$ értéket meg kell szoroznunk a döntési fán hozzá kapcsolódó előző szintű ($k-1$) pontszámával. Természetesen az AHP természetéből adódóan a lentebbi szintek kapcsolódó elemeinek pontszámait az új, Parsimonious súlypontszámokkal $u(c_{kp})$ kell szorozni.

2.4. Belső konzisztencia-mérés, immanens vizsgálat

Az AHP hierarchikus logikája alapján bármely felsőbb szinten lévő kritérium pontszámának teljes szétoztása történik az alsóbb szinteken, az adott kritériumhoz kapcsolódó elemek esetében, ezért kiemelt fontosságú a kezdeti döntési fa-struktúra. Amennyiben viszont egy vagy több szinten Parsimonious módszerrel értékeljük a kritériumokat, a hierarchikus logika egy újabb, immanens ellenőrzést biztosít a végső pontszámok tekintetében. Ha ez az ellenőrzés jelentős diszkrepanciát mutat ki a Parsimonious súlypontszámok és az AHP szintek súlypontszámai között, beavatkozásra van szükség. (Figyeljük meg, hogy ez már sokszoros ellenőrzés, míg a közlekedési felmérések másik nagy módszertani családjában, a DCM-ben egy ellenőrzési fázis sincs beépítve az értékelések megbízhatóságára és konzekvenciájára tekintetében!)

Az immanens analízis első lépéseként a kapott Parsimonious súlypontszámokat (u_{ckp}) normáljuk a következőképpen.

$$(2.3.) nu_{ckp} = \frac{u_{ckp}}{\sum_{p=1}^g u_{ckp}}$$

Tökéletes Parsimonious értékelés során (ami nagyon valószínűtlen) ennek a feltételnek kellene teljesülnie.

$$(2.4.) w_j = \sum_{p=1}^b nu_{ckp}$$

ahol w_j a kapcsolódó felsőbb szint AHP súlypontszáma, $b > 0$ a j kritériumhoz kapcsolódó elemek száma, ha b elem kapcsolódik a Parsimonious szinten, mint felsőbb szinten ($k-1$) lévő p kritériumhoz.

Minden kimutatott eltérés egyfajta érzékenység-vizsgálatnak is tekinthető a többszintű Parsimonious AHP-ben. A most következő valós döntési közlekedési probléma által mind a módszert, mind az immanens vizsgálatot be tudom mutatni részletekbe menően.

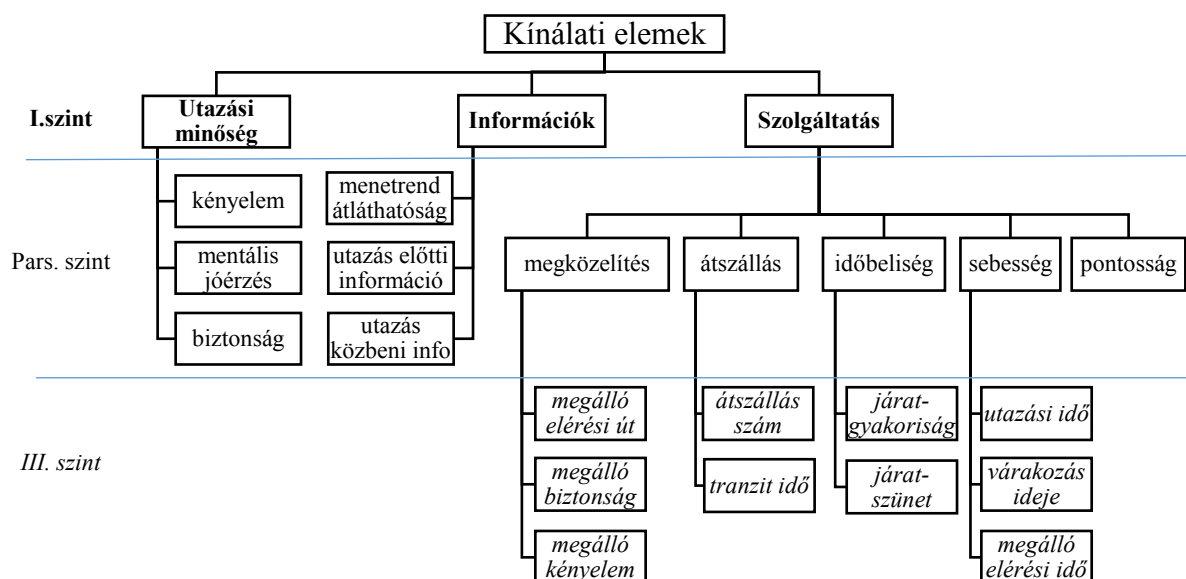
2.5. Közösségi közlekedési igény felmérése többszintű PAHP módszerrel

2019-ben, április 29. és május 1. között doktoranduszom, Sarbast Moslem felmérést végzett a törökországi Mersin-ben a lakosság közösségi közlekedés-fejlesztési preferenciáiról a helyi buszközlekedéssel kapcsolatban. Instrukcióim alapján ezt a felmérést már az új, többszintű PAHP modellem alapján készítette, korábban, 2018-ban a hagyományos AHP alapján már készített egy kérdőíves lekérdezést, sikeresen elemezte és annak alapján védte meg doktori értekezését.

A 2019-es PAHP felmérésben kifejezetten pozitív tapasztalatai voltak a Ph.D. hallgatónak, összehasonlítva a korábbi hagyományos AHP felméréssel. Jóval rövidebb kitöltési idő elegendő volt (10 perc a korábbi 45 perc helyett), az ellenőrző PAHP kört pedig email-ben meg tudta oldani napokon belül. Sokkal kisebb mintából volt elérhető az előre elhatározott, megfelelő konzisztenciájú 42 db. utas kérdőív, a felhasznált 3x3-as páros összehasonlítási mátrixot minden utas megfelelően konzisztensen töltötte ki, míg a hagyományos AHP lekérdezésnél (ahol szerepelt egy 5x5-ös mátrix is), ez az arány csupán 40% volt.

Nézzük most lépésenként, hogy folytattuk le a PAHP felmérést, valamint, hogy miként elemeztem a kapott adatokat! Az alábbi leírás alkalmas tetszőleges város vagy terület közlekedési fejlesztési igényeinek a felmérésére gyors és hatékony döntéstámogatási módszerrel, a több szintű PAHP-val.

1. Az 1-es ábrán látható modell 2-es szintjét választottam ki Parsimonious szintnek, hiszen egyrészt ezen a szinten található a legtöbb kritérium (11 db), valamint itt van egy ágon 5 döntési elem is (a Szolgáltatás kritérium alatt), azaz hagyományos AHP módszerrel egy 5x5-ös páros összehasonlítási mátrix kitöltését kellene végrehajtania az értékelőknek. A 2-es ábra demonstrálja a PAHP döntési struktúrát.



2. ábra: A többszintű döntési struktúra Parsimonious szintje

2. Mersin-ben a kiválasztott utasok elvégezték a 2-es (Parsimonious) szinten lévő kritériumok közvetlen értékelését (a kérdések lényege, hogy mely kritérium fejlesztését látják fontosabbnak Mersin buszközlekedésének javítása vonatkozásában) egy 0-100-as skálán, amelyet aztán összegeztünk és 0 és 1 közé normáltunk, a következő sorrendet kaptuk:

Mentális jóérzés (0.03); Megközelítés (0.04); Utazás közbeni információk (0.06); Időbeliség (0.07); Sebesség (0.08); Átszállás (0.09); Utazás biztonsága (0.10); Menetrend átláthatóság (0.11); Kényelem (0.12); Pontosság (0.13); Utazás előtti információk (0.17).

3. Ebben a fázisban megfelelő referencia-kritériumokat kellett választanom a Parsimonious (2-es) szinten a PAHP eljárásban. Bár, ahogy korábban kitértem rá, a szakirodalom nem határoz meg egyértelműen szükséges és elégséges referencia kritériumot, a 11 elemhez arányosan 3 elem kiválasztása elegendő lett, az eddig ismert egyetlen teszt példa alapján (Abastante, 2019) is ez volt a helyes választás. Az elemzés későbbi részében látható, hogy a kiválasztott 3 referencia-elem tökéletesen betöltötte a szerepét.

Az adott döntési problémához célszerű volt a 2-es fázisban megállapított kritérium-sorrend két extrém (legfontosabb, legkevésbé fontos), valamint egy közbenső elem kiválasztása. Az „Utazás előtti információk” ($\gamma_1 = 0.17$), egy közbenső elem, az „Átszállás” ($\gamma_2 = 0.09$), valamint a legkevésbé fontosnak ítélt kritérium, a „Mentális jóérzés” ($\gamma_3 = 0.03$) kerültek referencia-elem pozícióba. Megjegyzem, ha ennél több elemet választottam volna ki, a túl nagy páros összehasonlítási mátrixok problémájába ütközhettem volna (5 vagy ennél több kiválasztott elemnél), amelyet pont el akarunk kerülni. A már hivatkozott Abastante kutatásban 4 referencia-kritériumot választottak ki 13 elemből, így arányosan megfelelt az én kutatásom

az addigi egyetlen szakirodalmi példának. Azóta több PAHP modellt is vizsgáltam és ez az arány mindenhol megfelelőnek bizonyult.

4. Ezt a lépést már a 42 kitöltő az otthonában végezte el a doktoranduszom által kiküldött email alapján. A kiválasztott referencia-kritériumok páros összehasonlítását töltöttük ki, tulajdonképpen egy kis AHP értékelést készítették:

4. táblázat: a PAHP referencia-kritériumok páros összehasonlítása

CR = 0.09418	Utazás előtti információk	Átszállás	Mentális jóérzés	Pontszám	Helyezés
Utazás előtti információk	1	3.984	2.994	0.620	1
Átszállás	0.251	1	1.992	0.224	2
Mentális jóérzés	0.334	0.502	1	0.156	3

5. Ezután ellenőrizni kellett a páros összehasonlítások konzisztenciáját, amelyet már fel is tüntettem a 4-es táblázatban, látható, hogy a Saaty-általi küszöbszámnak, a 0,1-nek alatta marad a kalkulált CR, tehát a kitöltések megfelelően konzisztensek voltak. Ugyanígy, a monotonitást is sikerült verifikálni, hiszen a páros összehasonlításból adódó kritérium-sorrend pontosan megegyezik a direkt értékelésekből kapott sorrenddel.

6. Ezután alkalmazni tudtam a (2.2.)-es képletet a szinten lévő összes kritérium pontszámának kiszámításához. Terjedelmi okok miatt nem közlöm az összes számítást, de az érthetőség kedvéért megmutatom az egyik kritérium (Megközelítés) számítását.

$$u(\text{Megközelítés}) = 0.156 + \frac{0.224 - 0.156}{0.09 - 0.03} (0.04 - 0.03) = 0.156 + \frac{0.068}{0.06} (0.01) = 0.167$$

Az 5-ös táblázatban foglalom össze a döntési struktúra 2-es, azaz Parsimonious szintjén lévő elemek közvetlen értékelését, valamint a számított Parsimonious súly-pontszámaikat.

5. Táblázat: Utas értékelések eredménye közvetlen értékelések és a számított Parsimonious pontszámok

Kritérium	Közvetlen értékelés	Helyezés	Végső Parsimonious pontszám
Megközelítés	0.04	10	0.167

<i>Átszállás</i>	0.09	6	0.224
Időbeliség	0.07	8	0.201
Sebesség	0.08	7	0.213
Pontosság	0.13	2	0.422
Kényelem	0.12	3	0.373
<i>Mentális jóérzés</i>	0.03	11	0.156
Utazás biztonsága	0.10	5	0.274
Menetrend	0.11	4	0.323
<i>Utazás előtt info</i>	0.17	1	0.620
Utazás közben info	0.06	9	0.190

Mielőtt megkaphatjuk a döntéshez szükséges végső pontszámokat, vissza kell építeni a javasolt többszintű PAHP eljárásban az eredeti döntési hierarchiát (ez egy lényeges eltérés az eredeti, Abastante et al PAHP modellhez képest). Ahogy az 1-es ábrán látható, ugyanazokat a pozíciókat kell elfoglalniuk a döntési elemeknek, és az egy ágra tartozóakat kell 1-re normálni az 5-ös táblázat Parsimonious pontszámai alapján. Ha például a „Megközelítés”, „Átszállások”, „Időbeliség”, „Sebesség” és „Pontosság” egy ágon lévő csoportját nézzük, ezek Parsimonious pontszámát (az 5-ös táblázatból) kell 1-re normálnunk, hogy tovább tudjuk számolni.

Ezen felül a másik két, nem-Parsimonious szinten lévő elemek pontszámait is integrálnunk kell a modellbe. Ezeket hagyományos lekérdezés során, a direkt értékelésekkel együtt kaptuk meg. Mivel láthatóan maximum 3x3-as mátrixokat kellett értékelni a válaszadóknak, megfelelő konzisztenciával és viszonylag gyorsan meg tudták ezt tenni, a doktoranduszom instruálásával, közvetlenül a direkt értékeléseket követően. Ez a személyes szakasz jelentősen gyorsabb volt, mint a hagyományos AHP esetében, az email-es kitöltés pedig maximum 5 percet igényelt a résztvevőktől, így összességében jelentősen rövidebb, konzisztensebb és könnyebb kitöltések történtek az új PAHP eljárásban. Szemben a hagyományos eljárás 41 páros összehasonlításával, az új eljárás mindössze 21 páros összehasonlítást igényelt és 10 percre csökkentette a személyes lekérdezés idejét, összességében pedig, az email-es megkereséssel együtt 15 percre. Feltűnő volt ég a 2018-as pusztán AHP eljárással szemben, hogy egy panasz sem volt a nehezen érthetőség miatt a PAHP eljárásban, míg az AHP-nél ez jelentős gond volt. A végső pontszámokat a 6-os táblázat mutatja.

6. Táblázat: Az új PAHP eljárás normalizált eredménye a vizsgált közlekedési fejlesztési elemek fontosságára vonatkozóan. (Az 1-es és a 3-as szint pontszámai az eredeti AHP-ből származnak, a 2-es szinté pedig a Parsimonious eljárásból.)

I.szint		II.szint (parsimonious)		III.szint	
<i>Kínálati minőség</i>		<i>Szolgáltatás</i>		<i>Megközelítés</i>	
Szolgáltatás	0.374	Megközelítés	0,136	Megálló elérési út	0.464
Utazási minőség	0.466	Átszállás	0,183	Megálló biztonság	0.293
Információk	0.16	Időbeliség	0,164	Megálló kényelem	0.243
		Sebesség	0,174	<i>Átszállás</i>	
		Pontosság	0,344	Átszállás szám	0.675
		<i>Utazási minőség</i>		Tranzit idő	0.325
		Kényelem	0,465	<i>Időbeliség</i>	
		Mentális jóérzés	0,194	Járat-gyakoriság	0.702
		Utazás biztonsága	0,341	Járat-szünet	0.298
		<i>Információk</i>		<i>Sebesség</i>	
		Menetrend átláthat.	0,285	Utazási idő	0.265
		Utazás előtti info	0,547	Várakozási idő	0.236
		Utazás közbeni info	0,168	Megálló elérési idő	0.499

Az eljárás innen követi az AHP számítási módot, az egyes elemek végső pontszámait a hierarchiában közvetlenül felette levő kapcsolódó elem pontszámával szorozva kapjuk meg.

Ahogy a teoretikus leírásban már bemutattam, az általam javasolt új PAHP eljárás lehetőséget biztosít egy belső, immanens elemzésre a döntési szintek között. A prezentált esetben ugyanis a 2-es szintet a Parsimonious eljárással határoztuk meg, viszont az AHP-ben szabály, hogy a hierarchiában fentebb szereplő elemek pontszámainak elosztása történik a hozzájuk kapcsolódó, alsóbb szintű elemekhez. Ha ezt a logikát megfordítjuk, akkor az alsóbb elemek pontszámait összeadva meg kell kapnunk, a felettük lévő, hozzájuk kapcsolódó elem pontszámát. Természetesen, a Parsimonious teljesen más számítási műveletei miatt biztosan nem becsüli tökéletesen a felette álló elem pontszámát, de az eltérések fontos következtetésre adnak alkalmat, kvázi, mint egy érzékenység-vizsgálat.

Nézzük meg tehát, hogyan becsüli a 2-es Parsimonious szint a felette lévő, 1-es szint megfelelő elemeit!

7. Táblázat: Belső (immanens) elemzés a több szintű PAHP eljárásban

I.szint		II.szint (parsimonious)	
<i>Kínálati minőség</i>		<i>Szolgáltatás</i>	
Szolgáltatás	0.374	Megközelítés	0.167
Utazási minőség	0.466	Átszállás	0.224
Információk	0.16	Időbeliség	0.201
		Sebesség	0.213
		Pontosság	0.422
		Aggregált Szolgáltatás:	
		1.227	
		<i>Utazási minőség</i>	
		Kényelem	0.373
		Mentális jóérzés	0.156
		Utazás biztonsága	0.274
		Aggregált Utazási minőség:	
		0.803	
		<i>Információk</i>	
		Menetrend	0.323
		Utazás előtt info	0.620
		Utazás közben info	0.190
Normálás után		Aggregált Információk:	
		1.133	
	Szolgáltatás 0.388	Össz. parsimonious	3.163
	Utazási minőség 0.254		
	Információk 0.358		

Immanens normált PAHP pontszám „Szolgáltatás” = Aggregált Szolgáltatás/Össz. parsimonious = $1.227/3.163 = 0.388$

Immanens normált PAHP pontszám „Utazási minőség” = Aggregált Utazási minőség/Össz. parsimonious = $0.803/3.163 = 0.254$

Immanens normált PAHP pontszám „Információk” = Aggregált Információk/Össz. parsimonious = $1.133/3.163 = 0.358$

A belső elemzés alapján elmondható, hogy a „Szolgáltatás” kritérium AHP pontszámát (0,374) a PAHP igen pontosan becsülte meg (0,388). Ezzel szemben az „Utazási minőség” jóval alul, míg az „Információk” felülbecsültek. Ezt a jelenséget egyértelműen az „Utazás előtti információk” PAHP pontozásban való dominanciája magyarázza. Ahogy azt a 4-es táblázatban is láthattuk, az „Utazás előtti információk” a páros összehasonlítások során (és korábban a direkt értékelésben is) jóval nagyobb súlypontszámot kapott, mint a másik két kiválasztott referencia-elem. Ha a döntési struktúra egészét nézzük, megállapítható, hogy a kitöltők az 1-es szinten lévő „Információk” kritériumot általánosságban csekély jelentőségűnek értékelték, viszont ezen belül az „Utazás előtti információk” elem domináns, tehát ez lehet a diszkrepancia oka. Ha kivesszük ennek az egy kritériumnak a hatását, a PAHP közelítés sokkal szorosabb és jól közelíti az eredeti AHP pontszámokat. Amennyiben az immanens elemzést érzékenység-vizsgálatnak tekintjük, megállapíthatjuk, hogy erre az egy elemre az „Információk” kritériumon belül különös figyelmet érdemes fordítani és a fejlesztési tervekben nagy hangsúlyt adni neki, míg a másik két elem fejlesztése kevésbé lehet fontos az értékelők szerint.

2019 nyarán a vizsgált városban, Mersin-ben jelentős közösségi közlekedés-fejlesztést hajtottak végre, amely természetesen befolyásolta az új helyzetben a fejlesztési preferenciákat. Ez alkalmat adott arra, hogy leteszteljük Sarbast Moslem doktoranduszommal a PAHP módszer hagyományos AHP módszerhez hasonlított hatékonyságát nagy kitöltői mintán is (Duleba és Moslem, 2021). 2019. október 5-től 2019. november 4-ig egy 500 fős lekérdezést végeztünk a hagyományos AHP eljárás lépéseit követve, majd ugyanezen év december 6. és 27. között az általam javasolt PAHP eljárás szerint végeztük a lekérdezéseket ugyanekkora mintán. Az összehasonlítás módszerének ebben az esetben is a rangkorrelációt választottuk (hiszen az AHP egyik célja a szempontok rangsorolása), azonban itt szerettük volna vizsgálni az esetleges negatív korreláció jelenlétét a PAHP és az AHP rangsorok között, így a Kendall W összehasonlítási technika helyett a Spearman korrelációs formulát alkalmaztuk (Spearman, 1987):

$$(2.5.) R = 1 - \left(\frac{6 \sum d^2}{m^3 - m} \right)$$

ahol d jelöli a rang-helyezések közötti eltéréseket, m pedig a rangsorolt elemek (esetünkben adott szinten lévő kritériumok) számát. Amennyiben R értéke 1, az tökéletes pozitív rangkorrelációt mutat a két rangsor között, -1 esetén tökéletesen negatív a korreláció, a köztes értékek pedig enyhébb nagyságú összefüggést jeleznek. Hüvelykujj-szabályként a 0,5-ös értéknél nagyobb R -et már szignifikáns pozitív, a -0,5-nél kisebb R -et pedig szignifikánsan negatív korrelációnak értékeljük.

Röviden érdemes bemutatni a PAHP felmérés lépéseit és paramétereit. Rövid személyes interjúkat folytattunk Mersin város főbb buszjáratainak megállóiban. Két fázisban végeztük a felmérést: az elsőben az eljárás szimpla pontozási lépését hajtottuk végre, azaz a résztvevőknek a Parsimonius szinten lévő tényezőket kellett 0-100 között pontozni abból a szempontból, hogy

menyire tartják szükségesnek a fejlesztésüket. A második fázisban (pár héttel később, hiszen először értékelnünk kellett az első fázis eredményeit) a páros összehasonlításokat kértük, hogy értékeljék a kitöltők az első és a harmadik szinten, valamint a Parsimonius szint referencia elemei között. Így tulajdonképpen 500+500 fős lett a minta, hiszen nem ugyanazok az utasok vettek részt az első és a második fázisban, de így az eredmények robosztussága még inkább biztosítva volt. Ekkora nagyságú minta esetében nagyon lényeges a minta összetétele, amely a két fázisnál a következőképpen alakult.

8. Táblázat: A PAHP felmérés első körének demográfiai összetétele

Utas kitöltők = 500			%
Nem	Férfi	258	51.6
	Nő	242	48.4
Családi állapot	Házass	186	37.2
	Egyedülálló	314	62.8
Kor	18-30 év	313	62.6
	31-55 év	139	27.8
	> 55 év	48	9.6
Végzettség	Általános iskola	12	2.4
	Szakiskola	15	3
	Középiskola	184	36.8
	BSc fokozat	257	51.4
	MSc/PhD fokozat	32	6.4
Foglalkozás	diák	231	46.2
	alkalmazott (magán)	98	19.6
	alkalmazott (köz)	107	21.4
	nyugdíjas	64	12.8

Utazási gyakoriság	1-5 buszutazás/hét	59	11.8
	5-20 buszutazás/hét	291	58.2
	21-30 buszutazás/hét	139	27.8
	> 30 buszutazás/hét	11	2.2

9. Táblázat: A PAHP felmérés második fázisának demográfiai jellemzői

Utasok = 500			%
<hr/>			
Nem	Férfi	252	50.4
	Nő	248	49.6
Családi állapot	Házas	179	35.8
	Egyedülálló	321	64.2
Kor	18-30 év	321	64.2
	31-55 év	135	27
	> 55 év	44	8.8
Végzettség	Általános Iskola	9	1.8
	Szakiskola	11	2.2
	Középiskola	178	35.6
	BSc fokozat	264	52.8
	MSc/PhD fokozat	38	7.6
Foglalkozás	diák	243	48.6
	alkalmazott (magán)	93	18.6
	alkalmazott (köz)	104	20.8

	nyugdíjas	60	12
Utazási gyakoriság	1-5 buszutazás/hét	56	11.2
	5-20 buszutazás/hét	297	59.4
	21-30 buszutazás/hét	133	26.6
	> 30 buszutazás/hét	14	2.8

Mindkét minta igen hasonló Mersin tényleges közösségi közlekedés használó sokaságához a hivatalos török statisztikai felmérés szerint (TURKSTAT „TUIK” 2017), látható, hogy leginkább a diákok és az alkalmazottak vannak felülreprezentálva a mintákban, csakúgy, mint a hivatalos városi statisztika megállapította.

Az átlagos kérdőív kitöltési idő mindössze 5 perc volt az első fázis esetében (a szimpla pontozás még magyarázattal együtt sem vett igénybe többet), és 15 perc a második fázis esetében, de ekkor sem lépte át egy kitöltőnél sem a 21 percet. Mivel személyes megkeresést, és instruktort alkalmaztunk, nagyon magas válaszadási hajlandóságot sikerült elérni, 90% felett. Az instruktorkor a felmerülő közbenső kérdésekre is válaszolt, így az értékelések konzisztenciája is a legtöbb esetben megfelelő lett (természetesen a második fázisban volt érdemes mérni).

Az eljárás egyes lépései megegyeztek az előzőekben bemutatott lépésekkel, ezért ezek bemutatására itt már nem térek ki. Érdekes viszont az októberi hagyományos AHP felmérés, és a decemberi PAHP felmérés eljárási jellemzőinek összehasonlítása.

10. Táblázat: Az októberi, hagyományos AHP nagymintás felmérés jellemzőinek és a decemberi új, PAHP felmérés jellemzőinek összehasonlítása

	2019 október AHP felmérés	2019 december PAHP felmérés
<i>Helyszín</i>	Mersin, Törökország	Mersin, Törökország
<i>Kitöltők</i>	Utások	Utások
<i>Kérdezési technika</i>	személyes interjúk (instructor)	személyes interjúk (instruktorkor)
<i>Kitöltők száma</i>	500	500+500
<i>Kérdések száma</i>	6 demográfiai kérdés	6 demográfiai kérdés + közvetlen pontozás

	+ 27 páros összehasonlítás	+ 14 páros összehasonlítás
<i>Kérdések típusa</i>	Páros összehasonlítás	Közvetlen pontozás és néhány páros összehasonlítás
<i>Válaszadási arány</i>	kevesebb mint 50%	több mint 90%
<i>A felmérés időtartama</i>	29 nap	21 nap
<i>Átlagos kitöltési idő</i>	25-30 perc	5+15 perc
<i>Konzisztencia</i>	Minden kitöltés megfelelő	Minden kitöltés megfelelő

A 10-dik táblázatból látható, hogy felmérési jellemzők szempontjából a javasolt PAHP eljárás minden paraméterben legalább olyan jó, de legtöbb esetben jobb, mint a hagyományos AHP felmérés. Elsősorban a kitöltőktől elvárt erőfeszítés jóval kisebb az új módszernél, és ez meg is mutatkozik a kitöltési arányokban lévő különbségben (90% versus 50%). Mind a felmérés összes időtartamát, mind az egyéni kitöltési időket sikerült csökkenteni a PAHP eljárással.

Nézzük azonban, hogy mennyire megbízható eredményeket kaptunk a nagymintás PAHP felmérésben! Belátható, hogy mivel a javasolt új eljárás némileg információ-vesztéssel jár, hiszen nem lesz információnk a kitöltő összes páros összehasonlítási preferenciájáról úgy, mint a hagyományos AHP eljárásban, hanem ezt racionálisan redukáljuk a Parsimonious módszerrel. Következésképpen, ha a kapott PAHP eljárási eredmények hasonlóak egy teljes körű, hagyományos AHP felmérés (ugyanabban a városban, ugyanakkora mintán, hasonló demográfiai jellemzőjű kitöltőkkel, időben elég közel, nem változtatott közlekedési rendszerrel kapcsolatban) végső eredményeihez, akkor a javasolt PAHP eljárás megfelelően hatékony. Ha pedig megfelelően hatékony, akkor jelentős idő és költség megtakarítás érthető el a hagyományos AHP eljárással szemben.

A 2019 októberi, teljeskörű AHP felmérés a következő eredményeket hozta a buszközlekedés fejlesztésére vonatkozó három hierarchia szinten:

11. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az AHP felmérés eredményeképpen 1. szint

Tényező	Súlypontszám	Helyezés
Szolgáltatás	0.3980	1
Utazási minőség	0.2750	3
Információk	0.3270	2

12. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az AHP felmérés eredményeképpen 2. szint

Tényező	Súlypontszám	Helyezés
Megközelítés	0.0657	9
Átszállás	0.1357	2
Időbeliség	0.0744	8
Sebesség	0.0414	11
Pontosság	0.0808	6
Kényelem	0.1051	5
Mentális jóérzés	0.0564	10
Biztonság	0.1136	3
Menetrend átláthatóság	0.1393	1
Utazás előtti információ	0.1082	4
Utazás közbeni információ	0.0795	6

13. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az AHP felmérés eredményeképpen 3. szint

Tényező	Súlypontszám	Helyezés
Megálló elérés	0.0273	4
Megálló biztonság	0.0156	8
Megálló kényelem	0.0229	5
Átszállás szám	0.0955	1
Tranzit idő	0.0402	3
Járatgyakoriság	0.0576	2

Járatszünet	0.0168	6
Utazási idő	0.0145	9
Várakozási idő	0.0166	7
Megálló elérési idő	0.0103	10

Ezekhez az eredményekhez képest – amelyek hangsúlyozottan teljesen megbízhatóak, hiszen minden lehetséges páros összehasonlítást tartalmaztak, nagy kitöltői mintán, az AHP minden szabályát betartva, megfelelő konzisztencia- és érzékenységvizsgálattal történt a megállapításuk – a jóval idő- és költséghatékonyabb PAHP felmérés a következő eredményeket hozta (ebben az esetben csak három tizedes-jegyig számítottuk a súlypontszámokat).

14. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az új, PAHP felmérés eredményeképpen 1. szint

Tényező	Súlypontszám	Helyezés
Szolgáltatás	0.406	1
Utazási minőség	0.238	3
Információk	0.356	2

15. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az új, PAHP felmérés eredményeképpen 2. szint

Tényező	2. szint	
	Súlypontszám	Helyezés
Megközelítés	0,045	10
Átszállás	0,156	1
Időbeliség	0,051	8
Sebesség	0,044	11
Pontosság	0,109	4
Kényelem	0,101	5
Mentális jóérzés	0,046	9
Biztonság	0,091	7
Menetrend átláthatóság	0,145	2

Utazás előtti információk	0,118	3
Utazás közbeni információk	0,093	6

16. Táblázat: A döntési tényezők végső súlyai az új, PAHP felmérés eredményeképpen 3. szint

Tényező	3. szint	
	Súlypontszám	Helyezés
Megálló elérés	0,021	5
Megálló biztonság	0,010	10
Megálló kényelem	0,015	6
Átszállás szám	0,097	1
Tranzit idő	0,059	2
Járatgyakoróság	0,037	3
Járatszünet	0,014	7
Utazási idő	0,0114	8
Várakozási idő	0,022	4
Megálló elérési idő	0,0112	9

A fenti táblázatokból látható, hogy bár az eredmények (természetesen) nem azonosak, de hasonlóak, ez pedig nagyon ígéretes a javasolt új többszintű Parsimonious eljárás szempontjából. Számoljuk azonban ki konkrétan a két eljárás Spearman rangkorrelációját az egyes szintekre, vagyis azt, hogy az ugyanazon hierarchia-szinten lévő tényezőket hogyan rangsorolta a két különböző eljárás a közlekedés-fejlesztési fontosságukat tekintve!

17. Táblázat: A Spearman rang-korrelációs koefficiens a két eljárás eredményei között az 1-es hierarchia szinten

Tényező	Az	A	d_i	$(d_i)^2$
	AHP felmérés helyezése	PAHP felmérés helyezése		
Szolgáltatás	2	2	0	0
Utazási minőség	1	1	0	0

Információk	3	3	0	0
	$m = 3$		$R = 1$	

18. Táblázat: A Spearman rang-korrelációs koefficiens a két eljárás eredményei között az 2-es hierarchia szinten

Tényező	Az	A	d_i	$(d_i)^2$
	AHP felmérés helyezése	PAHP felmérés helyezése		
Megközelítés	9	10	19	1
Átszállás	2	1	3	225
Időbeliség	8	8	16	4
Sebesség	11	11	22	16
Pontosság	6	4	10	64
Kényelem	5	5	10	64
Mentális jóérzés	10	9	19	1
Biztonság	3	7	10	64
Menetrend átláthatóság	1	2	3	225
Utazás előtti információk	4	3	7	121
Utazás közbeni információk	6	6	12	36
	$m = 11$		$R = 0.829$	

19. Táblázat: A Spearman rang-korrelációs koefficiens a két eljárás eredményei között az 3-as hierarchia szinten

Tényező	Az	A	d_i	$(d_i)^2$
	AHP felmérés helyezése	PAHP felmérés helyezése		
Megálló elérés	4	5	9	56,25
Megálló biztonság	8	10	18	2,25

Megálló kényelem	5	6	11	30,25
Átszállás szám	1	1	2	210,25
Tranzit idő	3	2	5	132,25
Járatgyakoróság	2	3	5	132,25
Járatszünet	6	7	13	12,25
Utazási idő	9	8	17	0,25
Várakozási idő	7	4	11	30,25
Megálló elérési idő	10	9	19	6,25
$m = 10$		$R = 0.825$		

Ha mindhárom Spearman korrelációs értéket tekintjük, elmondható, hogy igen erős rangkorrelációt hozott a hagyományos AHP és az új, PAHP eljárás összehasonlítása. Ez különösen erős eredmény a harmadik hierarchia-szinten lévő döntési tényezők esetében, hiszen a felsőbb szintek elemeinek súlypontszám-eltérése az AHP sajátossága miatt leszivárog az alsóbb szintekre, ezáltal nagyobbá teszi az alsóbb szintek elemeinek eltéréseit. Ennek ellenére, még a harmadik szinten is 82,5%-os a Spearman rangkorrelációs együttható, ami mindenképpen nagyon erős kapcsolatot, és ezáltal komoly robosztusságot jelent az újonnan javasolt PAHP eljárást tekintve. Ezáltal kijelenthető, hogy az általunk lefolytatott nagy mintás módszer-összehasonlítás egyértelműen pozitív eredménnyel zárult, vagyis a javasolt új PAHP eljárás kevesebb idő- és költségráfordítással megfelelően megbízható eredményekre képes, mint a leginkább referenciának tekinthető hagyományos AHP eljárás.

I. Tézis. Kidolgoztam egy olyan, nemzetközileg is új, többszintű döntési hierarchiára is alkalmazható eljárást, amely az eredeti AHP módszernél jóval kevesebb páros összehasonlítást igénylő (azaz kisebb költséggel és kitöltési igénnyel járó) technika, és kis, és nagy kitöltői mintán egyaránt hatékonyan alkalmazható közösségi közlekedés-fejlesztési preferenciák felmérésére.

I/1. Lényeges, nemzetközileg is új eredmény, hogy a $u(c_{kp}) = u(c_{ke}) + \frac{u(c_{ke+1}) - u(c_{ke})}{\gamma_{ke+1} - \gamma_{ke}} (\gamma_{kp} - \gamma_{ke})$ képlet alkalmazásával fel tudtam oldani azt az erős feltételt, hogy a Parsimonious AHP kizárólag a döntési struktúra alsó szintjén, azaz az alternatívákra használható. Ezáltal olyan közlekedés-fejlesztési döntéseket is támogathatunk a módszerrel, mint a menetrend-átalakítások, megálló-áthelyezések vagy az új járművek beszerzési szükségessége.

I/2. Ezen felül a $nu_{ckp} = \frac{u_{ckp}}{\sum_{p=1}^g u_{ckp}}$ és $w_j = \sum_{p=1}^b nu_{ckp}$ képletekkel egy olyan belső ellenőrzési (immanens) eljárást vezettem be, amely alkalmas a Parsimonious döntési szint AHP szintekhez való hasonlítására és így egyfajta érzékenység-vizsgálatra.

I/3. Állításaimat két valós, közösségi közlekedési rendszer fejlesztésének döntéstámogatására használt felméréssel igazoltam.

A tézis eredményeihez kapcsolódó publikációim: Duleba et al (2012) Transport; Duleba et al (2013); Duleba és Moslem (2021), Applied Sciences; Duleba (2022) Journal of the Operational Research Society; Hamadneh et al, (2022), Transport Policy; Duleba és Moslem (2018) Sustainability,

3. A közlekedési preferenciák aggregálásának új útja: átlag-számítás helyett optimum-keresés

Amennyiben sikerült gyorsabbá és hatékonyabbá tenni a közlekedési preferenciák felmérését az 1-es tézisben ismertetett módon, érdemes megvizsgálni, vajon a nemzetközi kutatások megfelelően kezelik-e a csoportos felmérések globális végeredményének a megállapítását.

Leggyakrabban a közlekedés tervezésnél vagy fejlesztésnél az érintett populáció valamely csoportját kérdezzük le (Kent, 2022), esetleg szakértők vélemény-szintézisét szeretnénk megállapítani (Awad és Jung, 2022), mindkét esetben egyéni értékelések aggregálását kell végrehajtanunk ahhoz, hogy következtetést vonhassunk le.

A disszertációm tárgyát alkotó AHP módszer bár nem igényel nagy mintát (ahogy a Bevezető részben már kitértem rá), de megbízhatónak a „wisdom of the crowd” elv alapján a 30-as 40-es mintanagyság tekinthető, amelynél az aggregálás jelentős befolyásoló erővel bírhat.

3.1. Az eddigi preferencia aggregálási eljárások

Mindeddig két regnáló technikát ismertünk az egyéni preferenciák összegzésére és globális, közös preferenciává becslésére: Aggregation of Individual Judgements (AIJ) (Aczél és Alsina, 1986), valamint az Aggregation of Individual Preferences (AIP) (Basak és Saaty, 1993; Keeney, 2009). Az AIJ esetében a páros összehasonlítási mátrixokat egyénileg kitöltik, majd ezeket egy csoportos páros összehasonlítási mátrix-szá alakítják, úgy, hogy az egyes mátrixok adott pozícióban lévő értékeinek a geometriai átlagát veszik, ahogy azt az (1.6.)-os képletben láthatjuk. Az AIP-nál előbb kiszámoljuk az egyéni mátrixok súlyvektorát, majd ezek számtani vagy mértani átlaga adja a globális preferencia vektort.

Mivel az általam javasolt új aggregálás az egyéni prioritás vektorok újfajta, nem átlag-alapú megközelítését célozza, ezért az alábbiakban az AIP aggregálási eljárás két formáját, a számtani átlag alapú, illetve a mértani átlag alapú formuláját ismertetem.

Az AIP súlyozott számtani átlagot használó módszer (Weighted Arithmetic Mean Method (WAMM)), esetén a konszenzuális preferencia vektort, vagyis a globális csoport preferenciát $w^{(A)}$ -t úgy kapjuk meg, hogy aggregálunk minden egyéni preferencia vektort a következőképpen:

$$(3.1.) w_i^{(A)} = \sum_{k=1}^m a_k w_i^{(k)} \quad , i = 1, 2, \dots, n.$$

ahol a_k a k -adik kitöltő súlya (amennyiben különbözően súlyozzuk az egyes értékelőket), és $\sum_{k=1}^m a_k = 1$, ahol m a kitöltők száma.

Az AIP súlyozott mértani átlag formájában (Weighted Geometric Mean Method (WGMM)), a közös preferencia vektort ($w^{(G)}$) úgy kapjuk, hogy az egyéni prioritásokat a mértani átlag számításával összesítjük a következőképpen:

$$(3.2.) w_i^{(G)} = \frac{\prod_{k=1}^m (w_i^{(k)})^{a_k}}{\sum_{i=1}^n \prod_{k=1}^m (w_i^{(k)})^{a_k}}, i = 1, 2, \dots, n.$$

ahol $\sum_{k=1}^m a_k = 1$ ugyanúgy, mint az előző esetben.

Figyelembe véve azt, hogy mind az AIP, mind az AIJ lejárások meglehetősen réginek tekinthetőek, felmerülhet a kérdés, hogy az utóbbi években, a nemzetközi szakirodalomban történt-e vizsgálat az értékelésükre, illetve esetleges jobb technikával való kiváltásukra. Az egyik ilyen munka Ossadnik et al (2016) cikke, amely a különböző aggregálási eljárásokat összehasonlítva azt találta, hogy az AIP hatékonyabb az AIJ-nél, különösen a nagyobb kitöltői szám esetén. Az AIP technikán belül vizsgáldott Ishizaka és Labib (2011), akik azt a következtetést vonták le, hogy az AIP számtani átlagot alkalmazó aggregálása (WAMM) hatékonyabb a rangsor-fordulás elkerülése tekintetében, mint a geometriai átlag alapú AIP módszer (WGMM).

Magát az átlag-alapú aggregálást viszont 2020-ig senki nem kérdőjelezte meg a nemzetközi szakirodalomban sem. Ekkor jelent meg Amenta et al (2020) tanulmánya, amelyben egy új aggregálási módszert mutat be arra a kritikai évrre hivatkozva, hogy az átlag-alapú aggregálások túlságosan érzékenyek az extrém értékelésekre, ezáltal a közös preferenciát torzíthatják. Emiatt dolgozták ki a Common Preference Vector Process (CPVP) eljárást, amely az egyéni páros összehasonlítási mátrixok, valamint az azokból képzett globális mátrix közötti eltérések minimalizálásával operál a következőképpen:

$$(3.3.) \min_{\tilde{\lambda}_k, q} L(q, \tilde{\lambda}_k) = \sum_{k=1}^m a_k \|W_k - \tilde{\lambda}_k q q^T\|_F^2$$

Ahol $\|\cdot\|_F$ az úgynevezett Frobenius normát jelöli (ez tulajdonképpen matrix-távolság mérési norma az Euklideszi távolsághoz hasonlóan), $\sum_{k=1}^m a_k = 1$ ahogy az AIP-nél is láttuk, és W_k pedig:

$$(3.4.) W_k = \lambda_k q_k q_k^T$$

ahol λ_k a legnagyobb sajátértéke annak a páros összehasonlítási mátrixnak, amelyet a k -edik kitöltő töltött ki, míg q_k az ehhez a sajátértékhez kötődő sajátvektor. A módszerrel szemben kritikaként vetült fel bennem a magas számítási igény, valamint az AIJ logikájának követése, miközben a korábbiakban láthattuk, hogy az AIP-t hatékonyabbnak találták a szakirodalomban.

Ennek ellenére a későbbiekben a CPVP-t is bevontuk a benchmark-ba, vagyis az új aggregálási eljárást hasonlítottuk a CPVP-hez, hogy megtudjuk, valóban hatékonyabb-e, mint ez a széles körben ismert technika.

Ezt a tanulmányt olvasva fogalmazódott meg bennem az a gondolat, hogy az AIP aggregálás esetében annyi preferencia-vektorunk van egy n -dimenziós vektortérben (ahol n az összehasonlítandó kritériumok száma), ahány kitöltőnk volt a kérdőíves lekérdezés során. Ha az értékelésekben van egy, vagy egy pár extrém, például valaki a csoporttal ellentétben jóval nagyobb jelentőséget tulajdonít az utazás közbeni információ-ellátás fejlesztésének, mint a többiek, bármelyik AIP eljárást alkalmazva jelentősen eltérítheti a végső következtetést az extrém véleménye irányába, így végső soron fals fejlesztési döntés születhet. **Nem jellemezné-e jobban a csoport össz-preferenciáját, ha ebben a vektortérben egy olyan vektort keresnénk, amely a legkisebb össz-távolságra van az egyéni preferencia-vektoroktól, és ezt tekintenénk globális preferenciának?**

Természetesen ezt az új megközelítést bizonyítani is törekedtem megfelelő mennyiségű példával, valamint valós adatokon való teszteléssel egyaránt. Az elegendő mennyiségű példát egyedül szimulációval tudtam elérni, amelyek lefolytatásában segítséget nyújtott Szádóczi Zsombor kutató- és szerzőtársam.

3.2. A javasolt új, távolság-alapú eljárások és szimulációs tesztelésük

A probléma értelmezése tehát a következő. Keressük az adott vektortérben azt a vektort $w^{(E)}$, amely Euklideszi távolságokat tekintve a minimális össz-távolságra van az egyéni preferencia vektoroktól! Ezt kell tehát megoldanunk:

$$(3.5.) \operatorname{argmin} f(x)$$

ahol $x \in \mathbb{R}^n$ és $f(x)$ –et így definiáljuk:

$$(3.6.) f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot d_E(w^{(k)}, x))$$

ahol $d_E(w^{(k)}, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i^{(k)} - x_i)^2}$ az Euklideszi távolság, $k=1, \dots, m$ a csoport tagjainak a száma, és $\sum_{k=1}^m a_k = 1$ ugyanaz, mint ahogy fentebb többször is definiáltam. Vagyis meghatározzuk az \mathbb{R}^n vektortérben (ahol az n -dimenziót az n összehasonlítandó kritérium jelöli ki) azt a vektort, ami összességében a legközelebb van az egyéni preferencia vektorokhoz és aztán 1-re normáljuk.

Ismerünk azonban az Euklideszitől eltérő metrikákat is (Csebisev, Manhattan, stb.), ezek vagy nem értelmezhetőek az adott feladathoz, vagy látványosan alulteljesítettek egy előzetes szimuláció során, amelyet a szerzőtársam végzett el. Volt viszont egy kivétel, amit úgy találtunk, érdemes vizsgálni az Euklideszi metrika mellett: az Aitchison távolság. Figyelemre méltó sajátossága az Aitchison távolságnak, hogy kifejezetten hatékony statisztikai

problémáknál (Aitchison et al, 2000), sőt speciálisan közlekedési döntési problémáknál is (Feng et al, 2020). Ennek alapján érdemes volt bevonni a vizsgálatba ezt a nem-euklideszi metrikát, ugyanazzal a logikával, mint az előző esetben, csak most azt a vektort keressük, amely a legkisebb össztávolságra van az egyéni preferencia vektoroktól az Aitchison távolság alapján.

$$(3.7.) f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot d_A(w^{(k)}, x))$$

ahol d_A

$$(3.8.) d_A(w^{(k)}, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\log\left(\frac{w_i^{(k)}}{g(w^{(k)})}\right) - \log\left(\frac{x_i}{g(x)}\right) \right]^2}$$

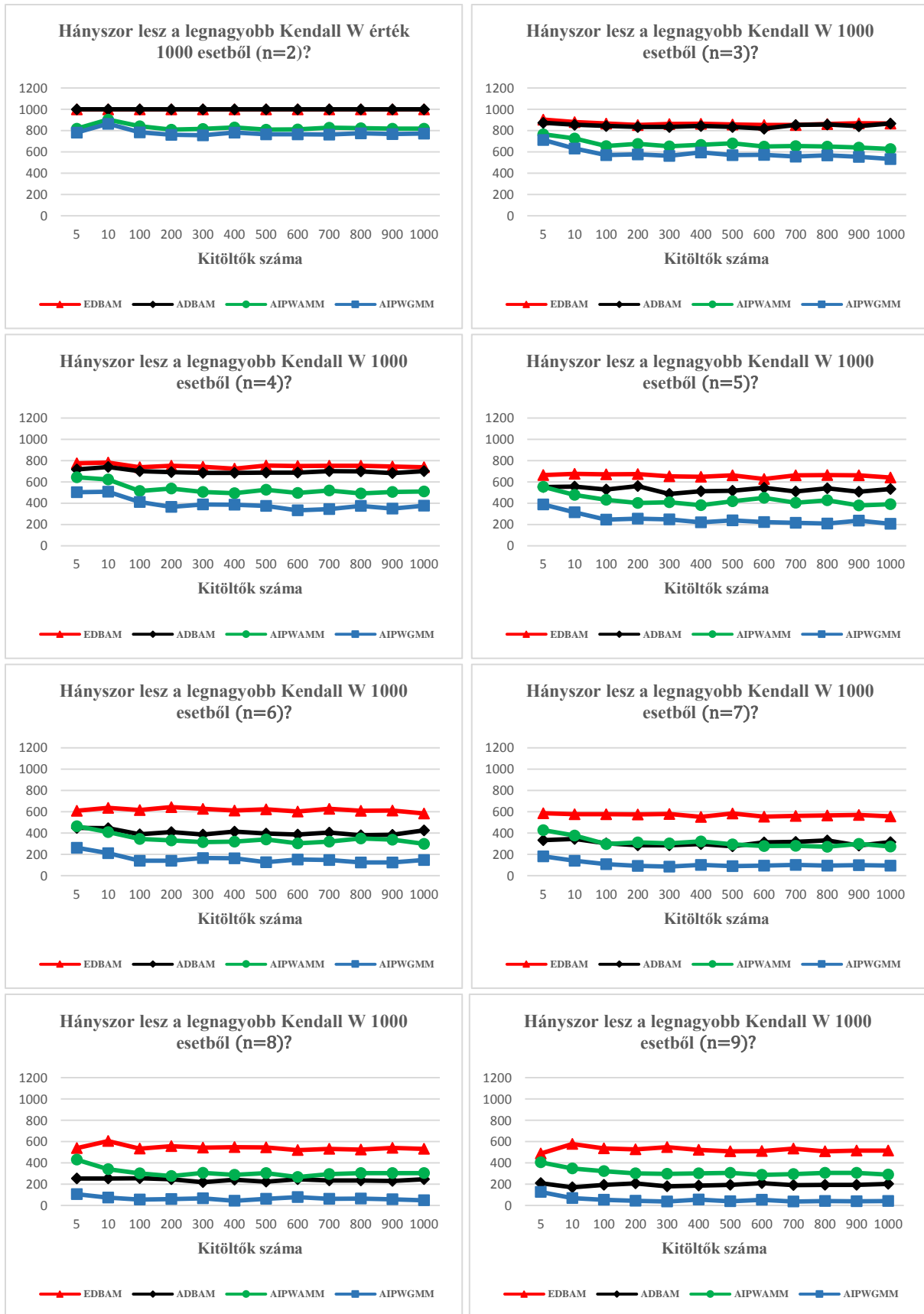
ahol $g(w^{(k)})$ és $g(x)$ az egyes vektorok geometriai közepét jelölik és $\log(\cdot)$ pedig a természetes alapú logaritmus függvény.

Mivel az előzetes szimulációk alapján látszott, hogy a két különböző metrika különböző közös preferencia-vektorokat eredményez, és hatékonyságban a dimenzió- és kitöltő-számtól függően hol egyik, hol másik bizonyul jobbnak, ezért két külön módszerként kezeltük őket, és két külön elnevezést is adtunk az Euklideszi alapú távolság-minimalizáló aggregálásnak (EDBAM), és az Aitchison-távolság alapú távolság-minimalizálási aggregálásnak (ADBAM).

Megoldó algoritmusnak mindkét esetben a Nelder és Mead (1965) által kifejlesztett robusztus eljárást alkalmaztuk, amelynek nézőpontunkból fontos előnye, hogy kizárólag függvény értékeket használ. R-be implementáltuk a módszert és egy olyan szimulációt készítettünk, amelyben random 1-re normált vektorokat generáltunk (hogy az egyéni preferencia vektoroknak megfeleljenek) különböző dimenziókban, 2-től 9-ig. Korábban már utaltam arra, hogy Saaty maximum 9x9-es páros összehasonlítási mátrixot tartott megfelelő konzisztenciával kitölthetőnek, ezért maximáltuk a dimenzió-számot 9-ben.

Kérdés még, hogy miként mérjük az újonnan javasolt két módszer (EDBAM és ADBAM) hatékonyságát. Meglátásom szerint, ha az új aggregálási technikák magasabb korrelációt mutatnak az egyéni vektorok és a globális preferencia vektor között, mint a két mainstream technika, az AIP WAMM és az AIP WGMM, akkor hatékonyabbnak mondhatjuk őket. Igaz ez akkor is, ha rangkorrelációt vizsgálunk a vektorok koordinátái között, hiszen célunknak leginkább ez felel meg a közlekedés-fejlesztési kritériumok értékelése és rangsorolása problémánál, ami a disszertációm központi eleme. A rangkorreláció mérésére a jól ismert Kendall W eljárást választottam (Kendall, 1938).

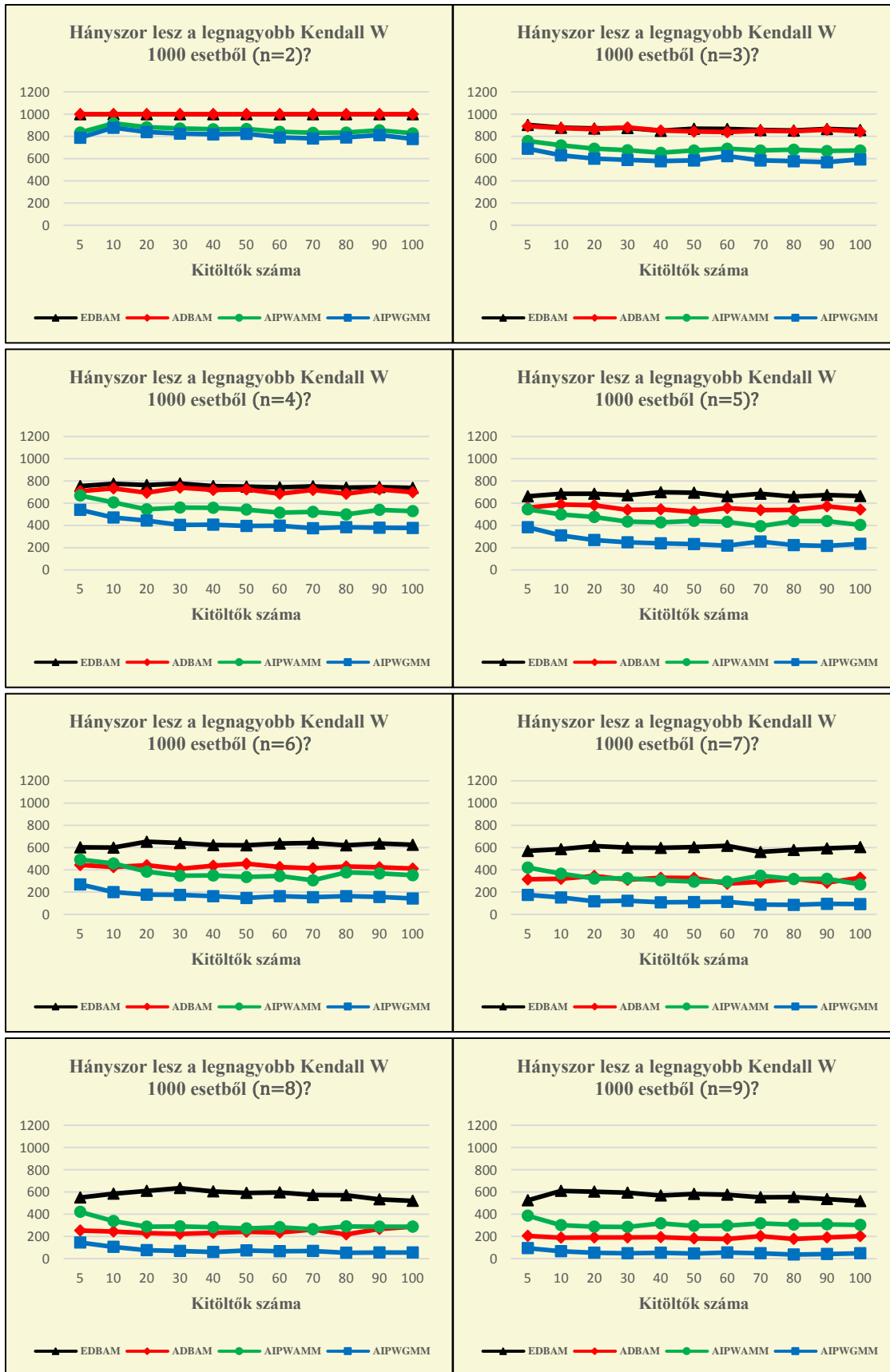
Szerzőtársammal érdemesnek tartottuk a szimulált kitöltők számát egész magasan is vizsgálni, napjainkban ugyanis egyre nagyobb teret nyer a nagy kitöltői mintán végzett több-kritériumos döntéstámogatás (Large-scale Multi-Criteria Decision-Making), így az 1000 kitöltős eseteket is vizsgáltuk. Így összességében 2-től 9 dimenzióig, 5,10,100,200...1000 kitöltőre kellett megnéznünk, egyenként 1000 esetet (a számítási idő figyelembe vételével egyenként 1000 esetben állapodtunk meg) azaz $8 \times 12000 = 96000$ esetet vizsgáltunk meg. Az eredményeket mutatja a 3. ábra.



3. ábra: A különböző aggregálási eljárások összehasonlítása nagy számú kitöltő esetén rangkorreláció szempontjából

Ahogy látható, az EDBAM és az ADBAM minden dimenzió-számnál és minden kitöltői számnál – bár változóan – felülteljesíti a már ismert két eljárást, az AIP WAMM-ot és az AIP WGMM-et. A szimuláció arra is fényt derített egyébként, hogy Ishizaka jól látta, az AIP eljárások közül a WAMM az erősebb, de a legfontosabb, hogy mindkettőt felülteljesíti mindkét újonnan javasolt, távolság-minimalizáláson alapuló eljárás (a 7-dik dimenzió két esetén kívül, ahol a WAMM megveri kicsit az ADBAM-et).

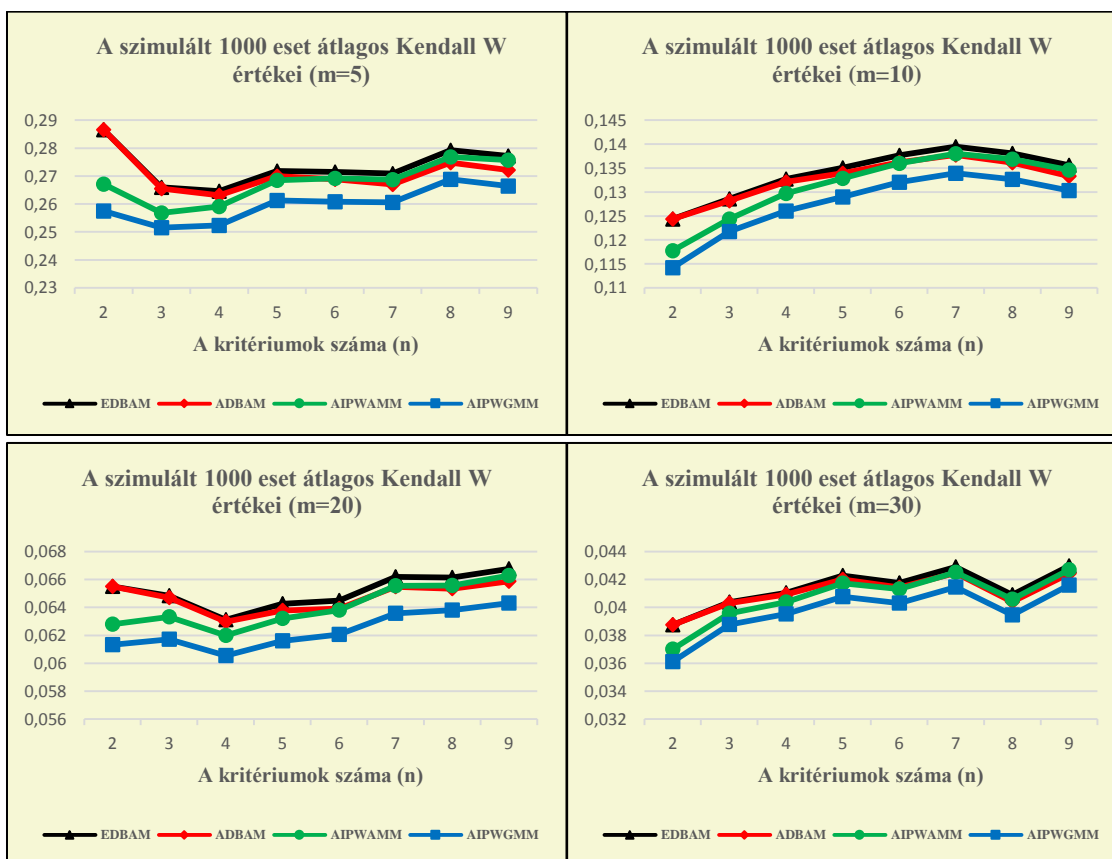
Számos esetben azonban a közlekedési preferenciák felmérésénél kisebb kitöltő számmal dolgozunk, egyrészt az érintettek ténylegesen kisebb száma esetén (pl. közlekedés-fejlesztési döntéshozók vagy közlekedési vállalat menedzserei csak néhány, vagy néhány tízes számban van jelen), másrészt a felmérésre fordítható kisebb költség vagy idő miatt. Következésképpen érdemes vizsgálni a kis mintás kitöltői számnál is az általam javasolt két, távolság-alapú aggregálási metódust. Szerzőtársammal, Szádóczki Zsomborral lefolytattuk tehát az 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, és 100 kitöltői szám esetén az egyéni és az aggregált preferencia vektorok koordinátáinak Kendall W rangkorrelációs értékét, az előzőekhez hasonlóan, egyenként 1000 eset szimulációja esetében. Az eredményeket az 5. ábra mutatja (az ábrán az Euklideszi távolság feketével, az Aitchison pirossal került jelölésre). Ahogy látható is, a két legmagasabb dimenzió (8 és 9) dimenzió kivételével mindkét távolság-minimalizáció alapú újonnan javasolt eljárás felülteljesít a hagyományos aggregálási technikákkal szemben, az Euklideszi pedig még a legmagasabb dimenziókban is szorosabb rang-korrelációt tudott elérni az összes többi eljáráshoz képest, sőt az előnye még növekedett is a többivel szemben. A 2,3 és 4 dimenziókban mind az Euklideszi, mind az Aitchison alapú távolság-szemlélet igen jól teljesít. Megjegyzendő, hogy a gyakorlati felmérésekben leginkább a 2-től 5 dimenzióig terjedő mátrix-nagyságokat, és ebből következően vektor nagyságokat használjuk, az 5x5-ösnél nagyobb páros összehasonlítási mátrixok megfelelő konzisztenciával kitöltése elsősorban a nem szakértő kitöltőknél már nehézségekbe szokott ütközni. Érdekes lehet még az, hogy az AIP WAMM minden esetben felülteljesít az AIP WGMM-hez képest, ami segíthet eldönteni azt a hosszas vitát (Amenta et al, 2020), amely a számtani és a geometriai átlag AIP eljárásban való szerepéről szól. Habár az általam javasolt aggregálási technikák mindkettőt felülteljesítik, így a kérdés okafogyottá válhat.

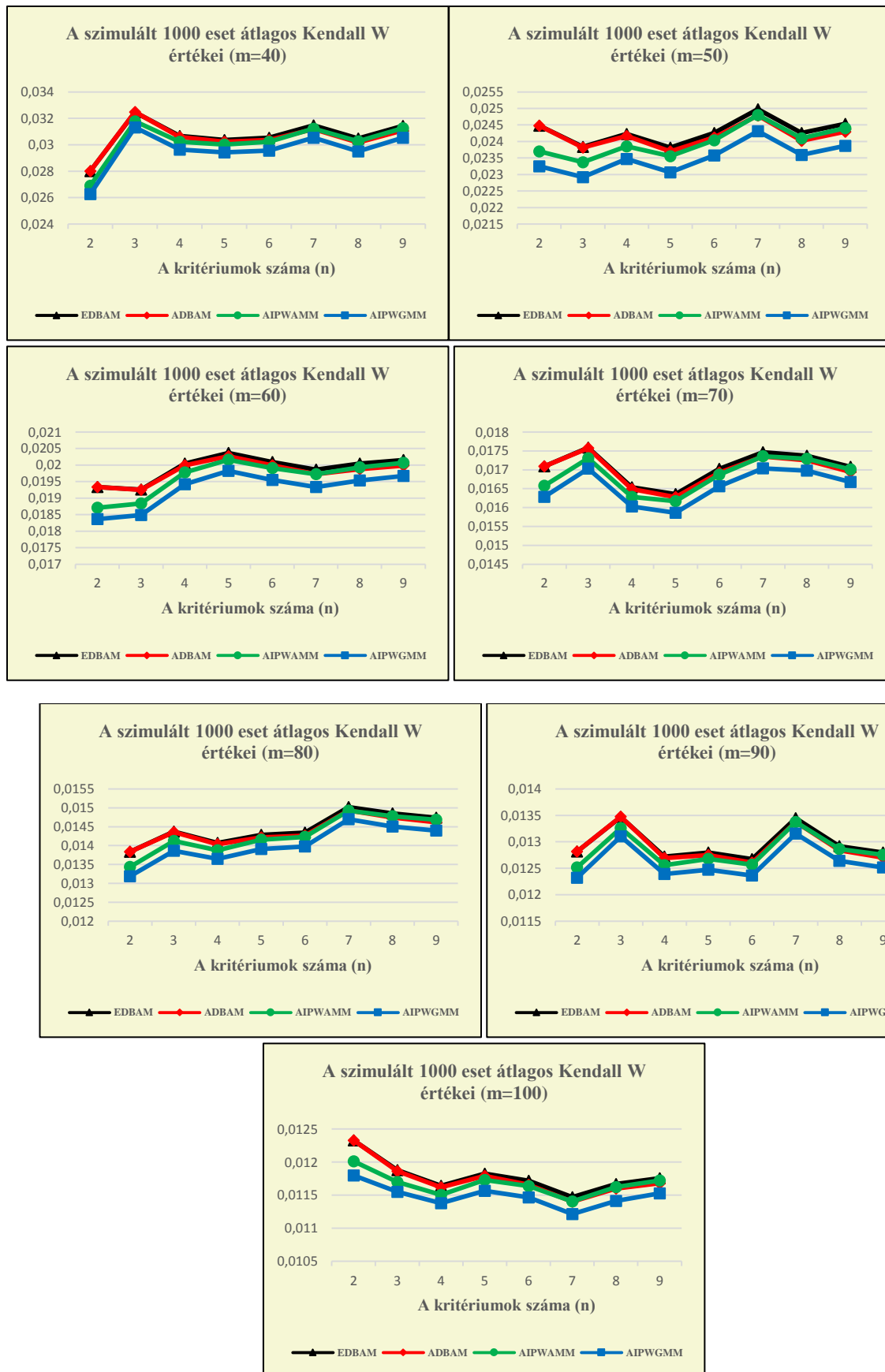


4. ábra: A különböző aggregálási eljárások összehasonlítása kis csoportos kitételek esetén rangkorreláció szempontjából

Újabb szimulációkkal még szemléletesebbé tudtuk tenni azt, hogy a javasolt, távolságmegközelítésű módszerek szorosabb kapcsolatot jelentenek az aggregált preferencia-vektor, és az egyéni kitöltői preferencia-vektorok között a nagyobb rang-korrelációs értékkel, mint a mainstream aggregálási technikák. Megvizsgáltuk, hogy a különböző dimenziókban (amelyek a kritériumok vagy az alternatívák számát jelentik az AHP modellekben), különböző kitöltői számoknál 1000 szimulációs esetben mekkorák az átlagos Kendall W értékek, azaz mekkora az átlagos rang-korreláció nagysága a különböző aggregálási eljárások esetében.

Ahogy a következő, 5. ábrán látható, az esetek domináns részében a fekete vagy a piros színű függvénye a másik kettő fölött helyezkedik el, azaz magasabb rang-korrelációt kapunk az egyéni és a globális preferenciák vektor-koordinátái között, ha az átalam javasolt távolságmminimalizációs aggregálási technikát követjük. A Kendall W értékei értelemszerűen csökkennének, ha növeljük a csoportban lévő egyéni kitöltők számát (m), de ez szisztematikusan igaz mindegyik aggregálási eljárásra, így az elemzésünk tárgyát, azaz a technikák hatékonyságvizsgálatát nem befolyásolja.





5. ábra: 1000 szimulációs eset átlagos Kendall W értéke a különböző aggregálási eljárások esetén kiscsoportos döntéshozatali eljárásoknál

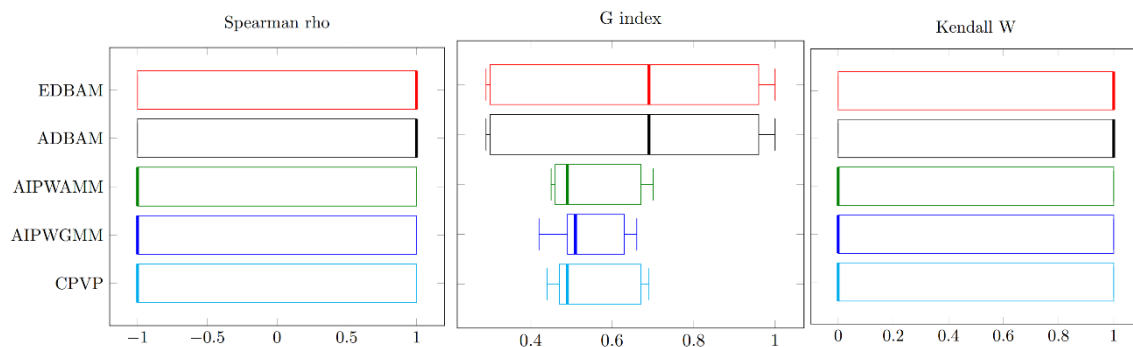
Ezek után tovább finomítottuk a szimulációkat, és az eddig vizsgált négy technika mellé bevontuk a legfrissebb, CPVP módszert is. Továbbá, a rang-korreláción túl, amely csak ordinális összehasonlításra képes, azaz a kritériumok súlypontoszámainak helyezéseit tudja összehasonlítani, alkalmaztuk a Spearman-rho mutatót, amely már kardinális korreláció mérésére is képes. Ahhoz, hogy még jobban lekövezzük az AHP eredeti folyamatát, már nem csak vektorokat generáltunk, hanem megfelelő konzisztenciájú páros összehasonlítási mátrixokat is, amelyekből kiszámoltuk a saját-vektor módszerrel a súlyvektorokat, és ezeket aggregáltuk az 5 különböző technikával. Kiszámoltuk ezen túl a leggyakrabban alkalmazott vektor-kompatibilitási indexet (Garuti, 2017), a G-indexet is, hogy az egyéni vektorok és a globális preferencia vektor közötti hasonlóság közvetlenül is mérhető legyen.

Két dimenziótól hét dimenzióig végeztük el a vizsgálatot, hiszen magas dimenziójú megfelelően konzisztens páros összehasonlítási mátrixot nagyon nehéz generálni, Bozóki és Rapcsák kimutatta, hogy ahhoz, hogy 8 vagy 9 dimenzióban ilyet találjunk, több mint 10 millió random generált esetet kellene vizsgálni (Bozóki és Rapcsák, 2008).

Két dimenzióban a következő eredményeket kaptuk.

20. Táblázat: A vizsgált öt eljárás G index-e, Spearman-indexe és Kendall W értéke, és azok szórása $n = 2$ esetre.

	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM	CPVP
G index átlag	0.640	0.640	0.551	0.542	0.518
Spearman átlag	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2
Kendall W átlag	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
G index szórás	0.320	0.320	0.111	0.089	0.106
Spearman szórás	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033
Kendall W szórás	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516

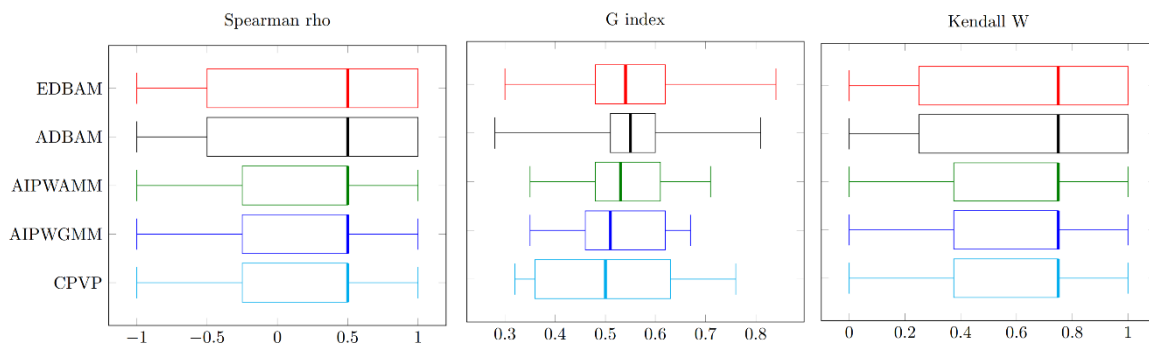


6. ábra: A kiszámított G index, Spearman korreláció és Kendall W két dimenzióban

3x3-as páros összehasonlítási mátrixok esetére, azaz három dimenzióban pedig a következő értékeket kaptuk az öt különböző technikára.

21. Táblázat: A vizsgált öt eljárás G index-e, Spearman-indexe és Kendall W értéke, és azok szórása $n = 3$ esetre.

	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM	CPVP
G index átlag	0.555	0.552	0.533	0.530	0.511
Spearman átlag	0.25	0.25	0.2	0.2	0.2
Kendall W átlag	0.625	0.625	0.6	0.6	0.6
G index szórás	0.161	0.146	0.104	0.100	0.163
Spearman szórás	0.791	0.791	0.632	0.632	0.632
Kendall W szórás	0.395	0.395	0.316	0.316	0.316



7. ábra: A kiszámított G index, Spearman korreláció és Kendall W három dimenzióban

Az ábrákon a vastag függőleges vonalak mutatják az átlag értékeket (minél inkább jobbra tolódik, annál jobb a korreláció), míg a téglalapok a szórásokat reprezentálják.

Megállapítható, hogy mind az EDBAM, mind az ADBAM javasolt technika felülteljesíti a másik három módszert ezekben a dimenziókban, és az általunk lefolytatott további elemzés azt mutatta ki, hogy a magasabb dimenziókban is (egészen a vizsgált 7-ig), bár a különbség egyre csökken. Ennek alapján a szimulációk bizonyították, hogy valóban olyan új eljárásokat sikerült találni a távolság-optimalizáló megközelítéssel, amely az egyéni preferencia vektorokhoz jobban hasonlító aggregált preferencia vektort eredményez.

3.3. Valós közlekedési felmérés-adatokon való tesztelés

Hátra van még azonban a valós adatokon történő tesztelés. Az előző tézisben már említett 2018-as teljes AHP felmérés (melyet doktoranduszon Sarbast Moslem készített a törökországi Mersin-ben) adataiból kiválasztottam 10 kitöltő értékelését, illetve az azokból számított súlyvektorokat az 1-es ábra öt kritériumot tartalmazó elemcsoportjára. Az alapadatokat mutatja a 10-es táblázat.

22. Táblázat: a 2018-as mersini AHP közlekedés-fejlesztési preferencia-felmérésből származó kitöltési adatok.

	Megközelítés	Átszállás	Időbeliség	Sebesség	Pontosság
1-es kitöltő	0.2406	0.2940	0.1408	0.1388	0.1858
2-es kitöltő	0.2575	0.1448	0.2244	0.1246	0.2488
3-as kitöltő	0.2886	0.0717	0.1257	0.2535	0.2604
4-es kitöltő	0.1853	0.2881	0.1707	0.1332	0.2227
5-ös kitöltő	0.2160	0.4059	0.0609	0.2129	0.1043
6-os kitöltő	0.0524	0.3127	0.2296	0.3135	0.0918
7-es kitöltő	0.0615	0.1586	0.2587	0.3635	0.1577
8-as kitöltő	0.2930	0.0721	0.2771	0.1625	0.1953
9-es kitöltő	0.2608	0.2143	0.1311	0.1546	0.2393
10-es kitöltő	0.2708	0.2189	0.2510	0.1739	0.0854

Természetesen az egyes egyéni preferencia vektorok 1-re normáltak, és látható, hogy eléggé szórnak, az 5-ös kitöltő például az átszállás fejlesztésének kiemelt fontosságot (0,4059) tulajdonított, míg a 8-as kitöltő ennek mindössze töredékét (0,0721) ítélte meg.

Számoljuk most ki először azt, hogy a különböző aggregálási technikák (EDBAM, ADBAM, AIP WAMM, AIP WGMM) milyen közös preferencia vektort adnak erre a 10-es kitöltői csoportra, majd nézzük meg az egyes esetekben számított Kendall W értékeket, és állapítsuk meg a rang-korreláció mértékeit!

A Kendall W kiszámításához a következő egyszerű képleteket használjuk:

$$(3.9.) W = \frac{12S}{m^2(n^3-n)}$$

ahol S

$$(3.10.) S = \sum_{i=1}^n (R_i - R)^2$$

és R

$$(3.11.) R = \frac{m(n+1)}{2}$$

valamint

$$(3.12.) R_i = \sum_{k=1}^m r_{i,k}, i = 1, 2, \dots, n$$

ahol $r_{i,k}$ az a rangsor, amelyet a k -adik értékelő adott az összes i kritériumra, R_i pedig az aggregált helyezései az i -edik kritériumnak.

Nézzük tehát az EDBAM milyen közös preferencia vektort állapít meg a csoportnak, és ez mennyire hasonlít az egyes kitöltők preferencia vektoraihoz abból a szempontból, hogy milyen kritériumokat milyen fontossági pozícióba rangsoroltak!

Az EDBAM közös preferencia vektor a (3.6.) képlet alapján:

23. Táblázat: Az EDBAM számítás alapján kapott közös vektor

EDBAM	
Megközelítés	0.2276
Átszállás	0.2234
Időbeliség	0.1792
Sebesség	0.1776
Pontosság	0.1922
Kendall W	0.1521

Amint a 23-as táblázat mutatja, a közös vektor koordinátái közül a „Megközelítés”-é a legnagyobb, ennek a fejlesztésére szánna legtöbb figyelmet a 10 kitöltő összességében az EDBAM aggregálás szerint, nem sokkal került második helyre az „Átszállás” döntési eleme. Természetesen ez nem egyezik meg minden egyes kitöltő preferencia sorrendjével, az 1-es kitöltő például csak a második helyre sorolta a „Megközelítés” kritériumot. A feladat az, hogy megnézzük, hogy minden egyes kitöltő sorrendjéhez képest mennyire korrelál az EDBAM általi csoport vektor koordináta sorrendje. A Kendall W-t pedig a következőképpen kaphatjuk meg.

24. Táblázat: A Kendall W számítása az EDBAM esetében.

Kritérium	1-es kitöltő helyezése	...	EDBAM általi helyezés	R_i	$(R_i - R)^2$
Megközelítés	2	...	1	23	100
Átszállás	1	...	2	30	9
Időbeliség	4	...	4	38	25
Sebesség	5	...	5	40	49
Pontosság	3	...	3	34	1
n = 5	m = 11	S = 184	R = 33	W = 0.1521	

Mivel nagyon szórtak az egyéni preferenciák, így a Kendall W érték sem mutat erős korrelációt, de az már eredmény, ha ez a rang-korreláció erősebb lesz, mint a többi, elsősorban mainstream módszer általi Kendall W, azaz korreláció.

Az Aitchison távolság alapján optimalizált közös preferencia vektort az ADBAM új javasolt módszerrel (3.8.) a kiválasztott valós adatok alapján a következőképpen kapjuk meg.

25. Táblázat: Az ADBAM eljárással kapott közös preferencia vektor.

ADBAM	
Megközelítés	0.2269
Átszállás	0.2215
Időbeliség	0.1764
Sebesség	0.1761
Pontosság	0.1990
Kendall W	0.1521

Látható, hogy bár az egyes koordináta értékek különböznek az ADBAM és az EDBAM eljárás esetén, a kritérium-rangsor megegyezik, így a Kendall W értéknek is ugyanannyinak kell lennie, ezért ennek számítási módját külön nem szerepeltetem.

Nézzük most az egyik, több évtizedes mainstream aggregálási technika, az AIP WAMM konszenzuális preferencia vektorát a 10 kitöltő csoportjára!

26. Táblázat: AIP WAMM által előállított közös preferencia vektor.

AIPWAMM	
Megközelítés	0.2126
Átszállás	0.2181
Időbeliség	0.1870

Gyorsaság	0.2031
Pontosság	0.1792
Kendall W	0.1289

A Kendall W értékét pedig így kaptuk meg.

27. Táblázat: A Kendall W érték számítása AIP WAMM aggregálás esetén.

Criteria	1-es kitöltő helyezése	...	AIP WAMM általi helyezés	R_i	$(R_i - R)^2$
Megközelítés	2	...	2	24	81
Átszállás	1	...	1	29	16
Időbeliség	4	...	4	38	16
Gyorsaság	5	...	3	38	36
Pontosság	3	...	5	36	9
n = 5	m = 11	S = 156	R = 33	W = 0.1289	

Láthatjuk, hogy az AIP WAMM gyengébb rang-korrelációt produkált, mint az újonnan javasolt EDBAM és ADBAM.

Végül nézzük a másik mainstream technika, az AIP WGMM teljesítményét!

Az AIP WGMM-mel a vizsgált 10-es csoportra előállított közös preferencia vektor.

28. Táblázat: Az AIP WGMM eljárás által kapott közös vektor.

AIPWGMM	
Megközelítés	0.2052
Átszállás	0.2099
Időbeliség	0.1902
Gyorsaság	0.2106
Pontosság	0.1841
Kendall W	0.0959

Az AIP WGMM tehát gyengébb rang-korrelációt hozott, mint az AIP WAMM, és jelentősen gyengébbet, mint a két új javasolt aggregálási technika, az EDBAM és az ADBAM. Ebben az esetben a Kendall W-t így számítottam ki.

29. Táblázat: A Kendall W számítása AIP WGMM eljárás esetében.

Kritérium	1-es kitöltő helyezése	...	AIP WGMM általi helyezés	R_i	$(R_i - R)^2$
Megközelítés	2	...	3	26	49

Átszállás	1	...	2	30	9
Időbeliség	4	...	4	37	16
Gyorsaság	5	...	1	36	9
Pontosság	3	...	5	36	9
n = 5	m = 11	S = 92	R = 33	W = 0.0959	

A tézis összefoglalásaként megállapítható, hogy kétféle szimuláció és egy valós közlekedés-fejlesztési felmérés is mind azt mutatja, hogy a javasolt két vektor távolság-minimalizáláson alapuló módszer, az EDBAM és az ADBAM is nagyobb teljesítményt tudott nyújtani a már ismert aggregálási módszerekhez képest. Ennek oka valószínűleg az, hogy egyes extrém, a csoporttól lényegesen különböző értékelések kevésbé térítik el a globális csoport preferenciát, mint az átlag-alapú aggregálási módszerek, legyenek azok akár számtani, akár geometriai átlagot használók.

Lényeges hozzátenni, hogy egyik új eljárásnak sem magas a számítási ideje, tehát a gyakorlatban is alkalmazhatóak. Minden csoportos AHP alapú felmérés aggregálása hatékonyabb lesz, ha közös vektort keresünk, semmint átlagolnánk az egyes preferencia vektorok koordinátáit.

Mindenképp kiemelendő, hogy a **modell nagy kitöltői mintán (large-scale) való alkalmazhatósága az automatizálási és számítástechnikai tudományterületre és gyakorlati problémák megoldására is hatással lehet.**

- II. **Tézis. Kidolgoztam két új eljárást, amelyeket EDBAM és ADBAM módszereknek neveztem el, és a nemzetközi szakirodalomban jelenleg alkalmazott AIP WAMM és AIP WGMM aggregálási technikáknál, valamint a nemrégiben felmerült CPVP technikánál is hatékonyabbak abból a szempontból, hogy az egyéni közlekedési preferenciákból olyan csoportpreferenciát alkot, amely jobban korrelál az összes egyéni preferenciához. Az Euklideszi távolság-minimalizáción alapuló EDBAM:**

$$f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot d_E(w^{(k)}, x))$$

$$d_E(w^{(k)}, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i^{(k)} - x_i)^2}$$

és ADBAM

$$f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot d_A(w^{(k)}, x))$$

$$d_A(w^{(k)}, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\log\left(\frac{w_i^{(k)}}{g(w^{(k)})}\right) - \log\left(\frac{x_i}{g(x)}\right) \right]^2}$$

képletekkel írható le.

II/1. Állításomat kétféle szimulációval és valós közösségi közlekedési felmérésből származó adatokkal is bizonyítottam. Következésképpen az új aggregációval a csoportpreferencia jobban tükrözi az egyes kitöltők preferenciáját, mint bármely más, a jelenlegi nemzetközi kutatásokban használt AHP technika.

A tézis eredményeihez kapcsolódó publikációim:

Duleba és Szádóczki (2022), Expert Systems with Applications; Szádóczki és Duleba (2022) Journal of Decision Systems; Duleba et al (2021) IEEE Access; Duleba és Moslem (2019), Expert Systems with Applications; Duleba et al (2021) European Transport Research Review; Duleba et al (2022) Transportation Research Interdisciplinary Perspectives

4. A közlekedésben érintett csoportok (stakeholderek) vélemény-szintézisének új megközelítése optimalizáció által

Ismert a nemzetközi szakirodalomban, hogy a közlekedésben érintett egyes csoportok, mint például a közlekedési vállalat képviselői, az utasok, a fenntartó által delegált személyek, lényegesen más információ ellátottsággal, motivációval és érdekekkel viszonyulnak egy adott közlekedés-fejlesztési döntéshez (Marcucci et al, 2018, Keserű et al, 2021).

Ezeket a különböző véleményeket nagyon nehéz szintetizálni, vagyis egy olyan konszenzusra jutni, amely elfogadható a különböző érintett csoportok számára, amely feltétlenül célunk kell, hogy legyen, hiszen a fejlesztési döntés csak akkor lesz fenntartható, ha azzal valamilyen szinten minden stakeholder elégedett (Macharis és Bernardini, 2015).

4.1. Mainstream módszerek a közlekedés-fejlesztési vélemény-szintézis kialakítására

Megoldásként két nagy áramlat található a szakirodalomban: a csoportok tárgyalásán alapuló módszerek (elsősorban a Multi-Actor, Multi-Criteria Analysis, MAMCA, Macharis et al 2009), valamint a számításon alapuló szavazásos módszerek (Ramanathan és Ganesh, 1994).

Mindkét fent említett módszertani ághoz azonban kritikusan érdemes viszonyulni. Egyrészt a tárgyalásos konszenzus kialakítás jelentős időbe és költségbe kerül, hiszen több forduló felmérésről van szó, másrészt bizonyos esetekben egyszerűen nem megvalósítható. Nézzük csak a disszertáció tárgyát, a közösségi közlekedési preferenciák felmérését. Egyértelmű, hogy az utasok csoportja kihagyhatatlan a megfelelő fejlesztési döntésből. Viszont hogy lehet azt megszervezni, hogy az utasok, a közlekedési vállalat képviselői és a fenntartó önkormányzat emberei egy külön workshop keretein belül alkudozzanak az egyes fejlesztési kritériumokról és végül megegyezés szülessen? A MAMCA módszer ezen fázisa egész egyszerűen nem életszerű és nagyon nehezen megvalósítható a problémánknál.

A számításon alapuló szavazásos matematikai módszerek mindegyikénél (eddig) is probléma állapítható meg. A jelenlegi szakirodalom vagy azt ajánlja, hogy értékeljék egymás döntési súlyát a résztvevő csoportok, mintegy az AHP struktúra részeként, páros összehasonlítással (Saaty, 1990), ezt „nulladik-szintű AHP”-nek is nevezik vagy szavazzanak csak a másik csoportok döntésben betöltött fontosságáról (Van den Honert, 2001). Belátható, hogy versengő vagy merőben eltérő motivációjú csoportoknál ez az értékelés nem vezethet eredményre (Qiuchen et al, 2022), mert mindegyik csoport törekedne a saját súlyának maximalizálására és a többiek minimalizálására. Ha magukról nem szavazhatnak, akkor pedig a hozzájuk közelebb álló csoport súlyát igyekeznének maximalizálni és a távolabb állókét minimalizálni. Különben is hogy dönthető el, hogy egy közösségi közlekedés-fejlesztési döntésnél hány százalék súlyt adjunk az utasoknak (Ye et al, 2023)?

Még egy érdekes módszertani megoldás született a problémára, mégpedig Cho et al (2008) azt javasolta, hogy állapítsuk meg egy-egy döntési csoport súlyát az általuk adott válaszok konzisztencia-mértéke alapján, azaz a konzisztensebb páros összehasonlításokat adó csoport kapjon nagyobb súlyt, a kevésbé konzisztens kisebbet. Annyiban egyet tudok érteni ezekkel a kutatókkal, hogy a konzisztensebb kitöltés valamennyire reflektál a motiváltságra, esetleg a

tájékozottságra, de úgy vélem, hiba lenne pusztán ez alapján megállapítani egy érintett csoport súlyát a döntésben. Tegyük fel, hogy (valószínűsíthetően) az utasok csoportja tölti ki legkevésbé konzisztens módon a közlekedés-fejlesztési kérdőíveket (Li et al, 2022, Bouraima et al, 2023)! Ennek feltétlen azt kell jelentenie, hogy az ő véleményüket kell legkevésbé figyelembe vennünk?

Megállapítható tehát, hogy az olyan döntési problémára, ahol a tárgyalásos egyeztetés nehézkes vagy nem megoldható, valamint a csoportok egymás súlyának megállapítása nem értelmes vagy konfliktussal terhelt, nem állt eddig rendelkezésre megfelelő módszertan még nemzetközi szinten sem.

4.2. A javasolt új megközelítés

Ebből született meg a harmadik tézisem, ami tulajdonképpen az előző, második tézisemnek egy módszertani továbbgondolása.

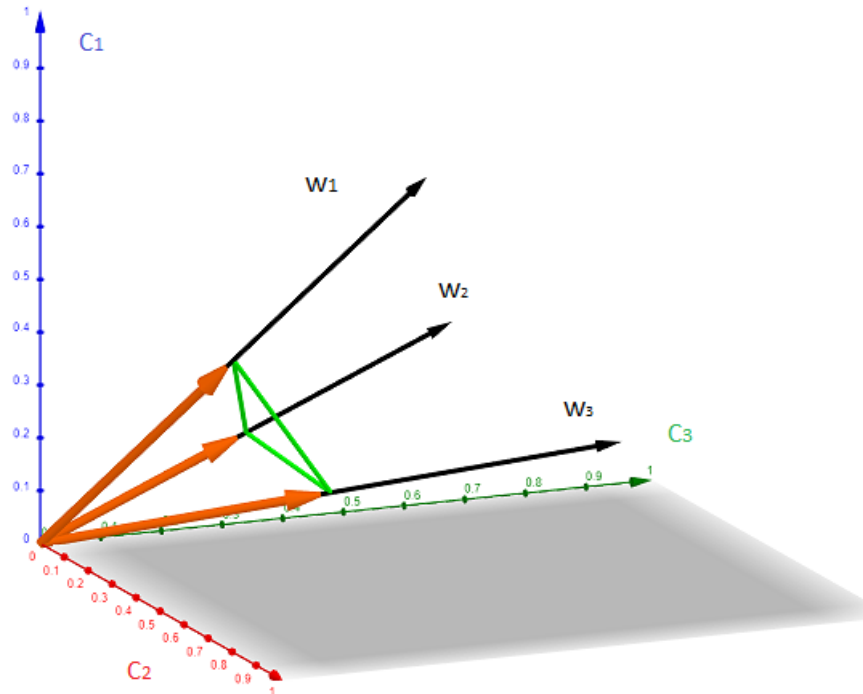
A csoportok súlyának matematikai alapú meghatározásánál is felhasználhatjuk ugyanis, hogy adott n -dimenziós vektortérben van néhány csoportvektorunk, és értelmes ezek Euklideszi távolságát minimalizálni.

Az általam javasolt eljárásnak tehát az a lényege, hogy a közlekedés-fejlesztési konszenzus kialakításához olyan súlyokat állapítsunk meg az egyes érintett csoportok globális preferencia vektorai számára (tudva, hogy a súlyok összege 1 az AHP logikát követve), hogy az így súlyozott vektorok távolsága minimális legyen. Belátható, hogy ez egyfajta konszenzust reprezentál, és pusztán matematikai eljárással elérhető, nincs szükség sem egyeztető workshop-ra, sem egymás súlyáról szavazásra.

A módszertant pontosan három kitöltői csoportra fogalmaztam meg, és bizonyítottam a konvexitását szerzőtársammal, Dr. Blahota Istvánnal (Duleba és Blahota, 2022). Azért lényeges, hogy a feladat konvex, mert így mindig egyértelműen megtalálhatóak azok az optimális súlyok, amelyekkel a három, n -dimenziós vektor távolsága minimális lesz. A módszer négy, illetve több kitöltői csoportra való kiterjesztése folyamatban van, ígéretes eredményekkel, amelyek azonban ezen disszertáció írásakor még nem kerültek publikálásra.

Az elv megértését segíti a következő ábra, ahol egy három-dimenziós vektortérben (a preferencia-vektoroknak 3 koordinátájuk van) ábrázolok három stakeholder csoport vektort és a súlyozott távolság-minimalizációjukat egy zöld háromszöggel jelölöm.

A koordináta-tengelyek a döntési probléma kritériumai, és természetesen a $[0;1]$ pozitív tartomány az érdekes számunkra, hiszen minden csoport preferencia-vektor 1-re normált. A narancssárga vonal jelöli azokat a súlyokat, amelyeket keresünk a súlyozott vektorok távolságának (zöld háromszög) minimalizálására. A súlyok is 1-re normáltak az AHP belső logikája alapján, ahogy azt az előzőekben is leszögeztem. A 8. ábra tehát azt demonstrálja, hogy a páros összehasonlításokból kapott súlyvektorok (w_1, w_2, w_3) az egyes stakeholder csoportok esetében olyan súlyokat kapnak (narancssárgával jelölve), hogy a súlyozott vektorok távolsága minél kisebb legyen (zöld háromszöggel jelölve).



8. ábra: A javasolt, optimális vektor-súly megállapításon alapuló konszenzus-keresési módszer 3-dimenziós demonstrációja

A továbbiakban matematikailag is megfogalmazom az újonnan javasolt konszenzus-keresési eljárás lényegét.

Vegyünk tehát egy véges számú kitöltőből álló sokaságot $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{l+h+t}\}$, amelyet előzetesen három csoportba sorolunk (a korábban már említett közlekedés-fejlesztési döntésben ezek az utasok, irányítók, és fenntartók) S_1, S_2, S_3 csoportokba. Mivel nagy valószínűséggel, különböző létszámú csoportokkal kell dolgoznunk, tegyük fel, hogy az S_1 -ben l számú, az S_2 -ben h számú, valamint az S_3 -ban t számú tag van! Azaz:

$$(4.1.) S_1 = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$$

$$(4.2.) S_2 = \{s_{l+1}, s_2, \dots, s_h\}$$

$$(4.3.) S_3 = \{s_{h+1}, s_2, \dots, s_t\}$$

Az egyszerűség kedvéért alkalmazzuk az AHP hagyományos aggregálási eljárását csoportokon belül, vagyis az Ossadnik et al (2016) által javasolt AIJ technikát az egyes kitöltők egyéni pontozásaiból az adott csoport preferenciájának a meghatározására. Tehát jelöljük $\mathbf{A}_1 \in \mathbf{A}^{n \times n}$ -ként az első, S_1 csoport aggregált csoportmátrixát a rangsorolandó n döntési elemre, $\mathbf{A}_2 \in \mathbf{A}^{n \times n}$ és $\mathbf{A}_3 \in \mathbf{A}^{n \times n}$ -ként pedig az S_2 és az S_3 csoportot. Ha követjük az AIJ (Aggregated Individual Judgements) aggregálási eljárást, akkor $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ mátrixokat így kaphatjuk meg (korábban

említettem, hogy AIJ-nél mindig a geometriai közeget használjuk elkerülendő a rangsorfordulást):

$$(4.4.) \mathbf{A}_1 = \sqrt[l]{a_{ij1}^{(1)} a_{ij1}^{(2)} \dots a_{ij1}^{(l)}},$$

$$(4.5.) \mathbf{A}_2 = \sqrt[h]{a_{ij2}^{(1)} a_{ij2}^{(2)} \dots a_{ij2}^{(h)}}, \text{ és}$$

$$(4.6.) \mathbf{A}_3 = \sqrt[t]{a_{ij3}^{(1)} a_{ij3}^{(2)} \dots a_{ij3}^{(t)}}.$$

Ahol $a_{ij1}^{(1)}$ az első tagjának az értékelését jelöli az első stakeholder csoportnak (S_1) az n döntési elem tekintetében, $a_{ij2}^{(1)}$ a második stakeholder csoport első emberének értékelését, és így tovább. A már korábban is ismertetett AHP konzisztencia szabály alapján csak azon kitöltőket lehet figyelembe venni, akik megfeleltek a konzisztencia-kritériumnak, azaz, $CR < 0.1$; ($CR = CI/RI$, ahol $CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}$, RI az átlagos CI érték az adott nagyságú random páros összehasonlítási mátrixok tekintetében). Tegyük fel az egyszerűség kedvéért, hogy $l + h + t$ a konzisztencia-küszöbnek megfelelő kitöltői létszám!

Ha meghatározzuk és kiszámoljuk az $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ aggregált csoport-mátrixokat, Saaty sajátvektor módszerével (ahogy korábban is jeleztem, már módszerek is lehetségesek) kiszámolhatjuk az egyes csoportok globális preferencia-vektorait a következőképpen:

$$(4.7.) (\mathbf{A}_1 - \lambda_{max1} \cdot I)w_1^{EM} = 0$$

$$(4.8.) (\mathbf{A}_2 - \lambda_{max2} \cdot I)w_2^{EM} = 0$$

$$(4.9.) (\mathbf{A}_3 - \lambda_{max3} \cdot I)w_3^{EM} = 0$$

Nyertünk tehát három saját-vektort az egyes csoportokra: $w_1^{EM}, w_2^{EM}, w_3^{EM}$, amelyek súlyvektoroknak is tekinthetőek, ha AHP egyszintű döntési problémát vizsgálunk (többszintűnél a módszer ugyanez, csak a súlyvektorhoz még be kell szoroznunk az előző szint megfelelő koordinátájával), és ezeknek a súlyvektoroknak a koordinátái a vizsgált n döntési elem jelentőségét demonstrálják.

Mivel csoportos preferencia vektorokként azonosíthatjuk ezeket, a súlyvektorokat jelöljük egyszerűbben, immáron elhagyva a saját-vektor módszert demonstráló EM (eigenvector method) jelölést, a három különböző stakeholder csoport globális preferencia vektorait $w_1^{EM} = w^{(1)}, w_2^{EM} = w^{(2)}$ and $w_3^{EM} = w^{(3)}$ -nak!

Fontos még megjegyezni, hogy $w^{(1)} = (w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, \dots, w_n^{(1)})^T$, ahol $\sum_{i=1}^n w_i^{(1)} = 1$ és $w_i^{(1)} > 0$ minden $\forall i$; $w^{(2)} = (w_1^{(2)}, w_2^{(2)}, \dots, w_n^{(2)})^T$, ahol $\sum_{i=1}^n w_i^{(2)} = 1$, és $w_i^{(2)} > 0$ minden $\forall i$; és $w^{(3)} = (w_1^{(3)}, w_2^{(3)}, \dots, w_n^{(3)})^T$, ahol $\sum_{i=1}^n w_i^{(3)} = 1$ és $w_i^{(3)} > 0$ minden $\forall i$.

Vagyis van három csoport preferencia vektorunk $(w^{(1)}, w^{(2)}, w^{(3)})$, amelyek 1-re normáltak egy n -dimenziós vektortérben, és az a célunk, hogy három olyan konszenzus súlyt határozzunk meg (mint csoport-súlyokat), amelyekkel a három csoport preferencia vektor Euklidesz-i távolságát minimalizáljuk, ezáltal egyfajta objektív konszenzust valósítva meg, valamint előállítunk egy konszenzusos preferencia vektort. Belátható, hogy a korábban röviden tárgyalt konszenzus-keresési eljárásoknál ez objektívebb és kisebb költség- és időráfordítással jár.

Jelöljük w^c -vel a keresett konszenzus preferencia vektort, amely mindhárom kitöltői csoport közös preferenciáját jeleníti majd meg! Legyen α az első kitöltői csoport optimális súlya, β a második csoporté, míg γ a harmadiké!

$$(4.10.) w_i^c = \alpha w_i^{(1)} + \beta w_i^{(2)} + \gamma w_i^{(3)}$$

ekkor megkapható a következő optimalizációs feladat megoldásával:

$$(4.11.) \min (\sqrt{(\alpha w_i^{(1)} - \beta w_i^{(2)})^2} + \sqrt{(\beta w_i^{(2)} - \gamma w_i^{(3)})^2} + \sqrt{(\gamma w_i^{(3)} - \alpha w_i^{(1)})^2})$$

a következő korlátozó feltételekkel:

$$(4.12.) \alpha + \beta + \gamma = 1$$

$$(4.13.) \alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$$

$$(4.14.) \sum_{i=1}^n w_i^{(1)} = 1, \sum_{i=1}^n w_i^{(2)} = 1, \sum_{i=1}^n w_i^{(3)} = 1$$

$$w_i^{(1)} > 0 \text{ minden } \forall i; w_i^{(2)} > 0 \text{ minden } \forall i; w_i^{(3)} > 0 \text{ minden } \forall i$$

A keresett súlyok pozitivitása egyértelmű, az összegük pedig azért 1, mert minden korábbi AHP konszenzus-kereső eljárásban feltétel, hogy tulajdonképpen az 1 (100%) szétosztása történjen meg súlyként a kitöltői csoportok között a fontosságuk arányában. Lényeges különbség viszont az, hogy amint a képletekből látható is, az általam javasolt eljárásban minden szubjektív tényező kizárt, pusztán a matematikai távolság-minimalizáláson alapul a módszer.

Amennyiben több szintű hierarchikus döntési problémáról van szó, a javasolt eljárás természetesen akkor is alkalmazható. Annyi különbség van, hogy figyelembe kell venni a felsőbb szint vonatkozó súlyvektorának koordinátáját, azaz:

$$(4.15.) w_f^c = w_j^c w_i^c$$

$$\text{és } (4.16.) \sum_{i=1}^n w_i^c = 1; \sum_{f=1}^n w_f^c = 1$$

ahol $1 > w_j^c > 0$ jelöli a megfelelő súly koordinátát az előző szintről; $w_i^c > 0$ ($i = 1, \dots, n$) a fentebb ismertett eljárás által meghatározott konszenzus vektort az adott szinten, és w_f^c ($i = 1, \dots, n$) a végső súlypontoszámot az adott szinten lévő döntési elemek számára.

Először bemutatom a disszertációmban is azt a numerikus példát, amelyet a módszer első publikálásakor (Duleba és Blahota, 2022) a Journal of the Operational Research Society folyóiratcikkben is szerepeltettünk.

Nézzünk tehát egy olyan számpéldát, ahol az általam javasolt konszenzus csoport vektort a korábban már említett, két leginkább alkalmazott csoport prioritás vektor képzésre használt módszerrel, az AIP WAMM-mal (ahol az egyes vektorok koordinátáinak számtani átlagát vesszük, és így állapítjuk meg a globális preferencia vektort), valamint az AIP WGMM-mel (ahol a mértani átlagot használjuk) hasonlítottam össze! A példából világosan látható, hogy mennyire szenzitív az extrém értékelésekre mindkét átlag-alapú mainstream eljárás, míg az általam javasolt módszer a többségi fontossági sorrendet tartja meg. Tegyük fel, hogy három stakeholder csoportra tudjuk osztani kitöltőinket, akik természetesen ugyanazokat a kritériumokat értékelték páros összehasonlításokat használva, mindenben követve az AHP szabályait! Szerepeltessünk három kritériumot a példában, valamint a sajátvektor módszert, így 1-re normált preferencia vektorokat kapunk! Látható az alábbi táblázatból, hogy az 1-es kitölő csoportnak a másik kettőhöz képest extrém preferenciái vannak, a fontossági sorrendje merőben más, mint a 2-es és a 3-as csoportnak, hiszen a második kritériumot nagymértékben preferálja, míg az a másik két csoportnál csak a harmadik helyen szerepel. Ezen felül mind a 2-es, mind a 3-as csoport pontosan ugyanazt a kritérium-sorrendet állapította meg, ez számít (kétharmados) többségi véleménynek.

	1-es csoport	2-es csoport	3-as csoport
1-es kritérium	0.110	0.640	0.500
2-es kritérium	0.760	0.240	0.390
3-as kritérium	0.130	0.120	0.110

Számítsuk most ki a különböző konszenzus megoldásokat a három technikával, azaz a két benchmark, átlagoláson alapuló AIP WAMM és AIP WGMM eljárásokkal, valamint az általam újonnan javasolt, optimális vektor-súlyokon alapuló eljárással a konszenzust a fenti számpélda értékeivel! Figyeljük meg, hogy az extrém értékelőként szereplő 1-es csoport preferencia értékei hogyan változtatják az egyes, globális konszenzus értékeket a különböző technikáknál!

AIP WAMM:

$$C1: (0.11+0.64+0.5)/3=0.417$$

$$C2: (0.76+0.24+0.39)/3=0.463$$

$$C3: (0.13+0.12+0.11)/3=0.12$$

AIP WGMM

$$C1: \sqrt[3]{0.11 \times 0.64 \times 0.5} = 0.3277$$

$$C2: \sqrt[3]{0.76 \times 0.24 \times 0.39} = 0.4143$$

$$C3: \sqrt[3]{0.13 \times 0.12 \times 0.11} = 0.1197$$

$$\sum C = 0.8617$$

$$C1: 0.3277 / 0.8617 = 0.38$$

$$C2: 0.4143 / 0.8617 = 0.481$$

$$C3: 0.1197 / 0.8617 = 0.139$$

Újonnan javasolt konszenzuális eljárás:

$$\alpha = 0.2732, \beta = 0.3464, \gamma = 0.3804$$

$$C1: 0.11 \times 0.2732 + 0.64 \times 0.3464 + 0.5 \times 0.3804 = 0.442$$

$$C2: 0.76 \times 0.2732 + 0.24 \times 0.3464 + 0.39 \times 0.3804 = 0.439$$

$$C3: 0.13 \times 0.2732 + 0.12 \times 0.3464 + 0.11 \times 0.3804 = 0.119$$

Az alábbi táblázat demonstrálja a három különböző konszenzus-számítás eredményeit, miközben mutatja a számpélda eredeti csoport prioritás vektorait a három különböző teoretikus csoportra vonatkozóan.

	1-es csoport	2-es csoport	3-as csoport	AIP WAMM	AIP WGMM	Javasolt eljárás
1-es kritérium	0.110	0.640	0.500	0.417	0.380	0.442
2-es kritérium	0.760	0.240	0.390	0.463	0.481	0.439
3-as kritérium	0.130	0.120	0.110	0.120	0.139	0.119

Mivel az AHP legtöbbször prioritálási döntési problémaként jelentkeznek a gyakorlatban (pl. válasszuk ki, melyik közlekedési project a legígéretesebb vagy melyik közlekedési módot választják majd legszívesebben az utasok), lényeges megvizsgálni, hogyan viselkedik az újonnan javasolt vector-minimalizáláson alapuló eljárás a már ismert mainstream megoldásokhoz képest a prioritálásban. Ekkor tehát csak ordinális szemszögből vizsgálódunk, vagyis az egyes kritériumok/alternatívák helyezései a fontosak számunkra. Az alábbi táblázat azt mutatja, hogy legalábbis a teoretikus számpélda esetén az új eljárás jobban megőrzi a többség (67%, a 2-es és a 3-as csoport) prioritálását, mint a másik két mainstream eljárás, az AIP WAMM vagy az AIP WGMM. Konszenzus megoldásnak tehát hatékonyabb az új eljárás, mint a benchmark.

	1-es csoport	2-es csoport	3-as csoport	AIP WAMM	AIP WGMM	Javasolt eljárás
1-es kritérium	3	1	1	2	2	1
2-es kritérium	1	2	2	1	1	2
3-as kritérium	2	3	3	3	3	3

Látható tehát, hogy amint arra számítottunk is, az egyik csoport (az 1-es) többiekhez képesti extrém preferencia értékelése jóval szignifikánsabb hatást gyakorol a konszenzus rangsorra akkor, ha az átlag-alapú eljárásokat alkalmazzuk, amelyek a benchmark eljárásaink. Ez igaz mind a számtani, és még inkább a mértani átlag használatára az aggregálásnál. Ezzel szemben az újonnan javasolt eljárás meg tudta tartani a domináns (kétharmados) kritérium-sorrendet. Ez a szám példa jól mutatja, hogy a vector-távolság minimalizálására épülő konszenzus-keresés kevésbé érzékeny az extremitásra, ezért hatékonyabb lehet, mint a már ismert konszenzus-kereső benchmark eljárások.

A továbbiakban azonban meg kell vizsgálnunk, hogy valós felmérési adatokon hogyan viselkedik az új aggregálási és konszenzus-megállapítási technika.

4.3. Az új eljárás tesztelése egy valós közlekedés-fejlesztési problémán

2017-ben a már többször említett Mersin török városban olyan felmérést készítettünk Sarbast Moslem doktoranduszommal, amely az 1. ábrán már ismertetett közösségi közlekedés-fejlesztési döntést 3 kitöltői csoporton vizsgálta: a közösségi közlekedést használókon, az azt nem használó városlakókon, valamint a helyi önkormányzat reprezentánsain. A kérdőívet, valamint az eredmények értékelését egyaránt a hagyományos AHP eljárás alapján készítettük, illetve végeztük el. Az eredményeket, egyes stakeholder csoportok vonatkozásában, a 30., 31. és 32. táblázat mutatja.

30. Táblázat: Csoportonkénti prioritások az 1-es hierarchia szinten.

	Utások		Nem-utas lakosok		Önkormányzat	
1	Utazási minőség	0.4658	Utazási minőség	0.3927	Információk	0.5849
2	Szolgáltatás	0.3743	Információk	0.3541	Utazási minőség	0.2776
3	Információk	0.1599	Szolgáltatás	0.2532	Szolgáltatás	0.1375

31. Táblázat: Csoportonkénti prioritások a 2-es hierarchia szinten.

	Utások		Nem-utas lakosok		Önkormányzat	
1	Biztonság	0.2696	Biztonság	0.1817	Menetrend átláthatóság	0.2003
2	Kényelem	0.1253	Utazás előtti info	0.1418	Utazás előtti info	0.1945
3	Átszállás	0.0966	Utazás közbeni info	0.1336	Utazás közbeni info	0.1902

4	Időbeliség	0.0925	Mentális jóérzés	0.1086	Kényelem	0.1369
5	Megközelítés	0.0871	Kényelem	0.1024	Mentális jóérzés	0.1158
6	Utazás előtti info	0.0739	Pontosság	0.0842	Sebesség	0.0384
7	Mentális jóérzés	0.0709	Menetrend átláthatóság	0.0786	Átszállás	0.0347
8	Pontosság	0.0685	Átszállás	0.0552	Időbeliség	0.0336
9	Utazás közbeni info	0.0553	Sebesség	0.0515	Biztonság	0.0248
10	Menetrend átláthatóság	0.0307	Időbeliség	0.0325	Megközelítés	0.0187
11	Sebesség	0.0296	Megközelítés	0.0298	Pontosság	0.0121

32. Táblázat: Csoportonkénti prioritások a 3-as hierarchia szinten.

Utasok			Nem-utas lakosok			Önkormányzat		
1	Járatgyakorosság	0.0649	Tranzit idő	0.0392	Járatszünet	0.0260		
2	Átszállás szám	0.0604	Megálló elérési idő	0.0238	Átszállás szám	0.0202		
3	Megálló elérés	0.0404	Járatgyakorosság	0.0213	Utazási idő	0.0160		
4	Tranzit idő	0.0362	Átszállás szám	0.0160	Tranzit idő	0.0145		
5	Járatszünet	0.0276	Megálló biztonság	0.0157	Megálló elérési idő	0.0133		
6	Megálló biztonság	0.0255	Várakozási idő	0.0151	Megálló kényelem	0.0106		
7	Megálló kényelem	0.0212	Utazási idő	0.0125	Várakozási idő	0.0091		
8	Megálló elérési idő	0.0148	Járatszünet	0.0112	Járatgyakorosság	0.0076		
9	Utazási idő	0.0078	Megálló kényelem	0.0093	Megálló biztonság	0.0049		
10	Várakozási idő	0.007	Megálló elérés	0.0048	Megálló elérés	0.0033		

Látható a fenti táblázatokból, hogy az egyes kitöltői csoportok döntési elemekre vonatkozó súlypontoszámai, és az ebből következő prioritási rangsor már a hierarchia legfelső szintjén igen eltérőek, a lentebbi döntési szinteken pedig, ahogy várható is volt, ez az eltérés még inkább tetten érhető.

Az előzőekben bemutatott optimalizálási eljárással kiszámítottam az egyes szintek konszenzuális preferencia vektorait.

33. Táblázat: Az új konszenzuális eljárás súlyai az 1-es szinten

Helyezés	Kritérium	Végső pontszám
1	Utazási minőség	0.3818
2	Információk	0.3601
3	Szolgáltatás	0.2581

34. Táblázat: Az új konszenzuális eljárás súlyai a 2-es szinten

Helyezés	Kritérium	Végső pontszám
1	Utazás előtti információk	0.1431
2	Biztonság	0.1430
3	Kényelem	0.1283
4	Utazás közbe információk	0.1258
5	Mentális jóérzés	0.1105
6	Menetrend átláthatóság	0.0912
7	Átszállás	0.0627

8	Időbeliség	0.0535
9	Pontosság	0.0518
10	Sebesség	0.0482
11	Megközelítés	0.0420

35. Táblázat: Az új konszenzuális eljárás súlyai a 3-as szinten

Helyezés	Kritérium	Végső pontszám
1	Átszállás szám	0.0318
2	Tranzit idő	0.0309
3	Járatgyakoróság	0.0293
4	Járat szünet	0.1258
5	Megálló elérési idő	0.0210
6	Megálló kényelem	0.0155
7	Megálló biztonság	0.0151
8	Utazási idő	0.0148
9	Várakozási idő	0.0123
10	Megálló elérés	0.0114

Doktoranduszommal, és két osztrák kutatótársunkkal közösen egy másik publikációban (Ghorbanzadeh et al, 2019) kiszámoltuk egy másik módszer, az Interval Analytic Hierarchy Process (IAHP) által meghatározott aggregált súlypontszámokat is az eredményekből. Egy korábbi kutatásból (Duleba és Moslem, 2018) pedig rendelkezésre álltak az úgynevezett „nulladik szint” AHP modell csoport súlyai, ahol a kitöltői csoport súlyokat ugyanúgy kapjuk meg, mint az egyes döntési elemek súlyait, azaz páros összehasonlítások eredményeként. Ezáltal lehetővé vált tesztelni a javasolt eljárást két másik módszer eredményeivel összehasonlítva. Ahogy a korábbi esetekben is, a Kendall W rang-korreláció megfelelő eszköznek bizonyult annak az összehasonlítására, hogy az egyes konszenzus-kereső eljárások által meghatározott konszenzus preferencia vektor koordináta nagyság-sorrendje (azaz a kritériumok fontossági sorrendje) mennyire felel meg az egyes kitöltői csoportok koordináta nagyság-sorrendjével. Természetesen minél nagyobb a rang-korreláció értéke, annál sikeresebb a konszenzus-keresési eljárás, hiszen annál jobban hasonlít a konszenzuális megoldás pontszám-sorrendje az egyes csoportok döntési elem prioritásaihoz.

A javasolt vektor távolság-minimalizálás alapján kialakított konszenzus esetében az egyes szinteken a következő Kendall W korrelációs értékek számíthatóak.

36. Táblázat: Az új, távolság-alapú konszenzus Kendall korrelációs értéke az 1-es hierarchia szinten

Kritérium	Utás	Nem-utás	Önkormányzat	Új-eljárás konszenzus	R_i	$(R - R_i)^2$
Szolgáltatás	2	3	3	3	11	9
Utazási minőség	1	1	2	1	5	9
Információk	3	2	1	2	8	0

Ahol $n=3$, $m=4$, $s=18$, $R=8$, így a kalkulált $W=0.5625$.

37. Táblázat A 0-szint módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 1-es szinten

<i>Kritérium</i>	Utas	Nem-utas	Önkormányzat	0-szint	R_i	$(R - R_i)^2$
Szolgáltatás	2	3	3	3	11	9
Utazási minőség	1	1	2	2	6	4
Információk	3	2	1	1	7	1

Ahol $n=3$, $m=4$, $s=14$, $R=8$, így $W=0.4375$.

38. Táblázat: Az IAHP módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei az 1-es szinten

<i>Kritérium</i>	Utas	Nem-utas	Önkormányzat	Interval AHP	R_i	$(R - R_i)^2$
Szolgáltatás	2	3	3	3	11	9
Utazási minőség	1	1	2	1	5	9
Információk	3	2	1	2	8	0

Ahol $n=3$, $m=4$, $s=18$, $R=8$, így $W=0.5625$.

39. Táblázat: Az új módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 2-es szinten

<i>Kritérium</i>	Utas	Nem-utas	Önkormányzat	Új eljárás	R_i	$(R - R_i)^2$
Megközelítés	5	11	10	11	37	361
Átszállás	3	8	7	7	25	49
Időbeliség	4	10	8	8	30	144
Sebesség	11	9	6	10	36	324
Pontosság	8	6	11	9	34	256
Kényelem	2	5	4	3	14	16
Mentális jóérzés	7	4	5	5	21	9
Biztonság	1	1	9	2	13	25

Mentrend átláthatóság	10	7	1	6	24	36
Utazás előtti információk	6	2	2	1	11	49
Utazás közbeni információk	9	3	3	4	19	1

Ahol $n=11$, $m=4$, $s=1270$, $R=24$, így $W=0.7216$.

40. Táblázat: A 0-szint módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 2-es szinten

<i>Kritérium</i>	Utas	Nem-utas	Önkormányzat	0-szint	R_i	$(R - R_i)^2$
Megközelítés	5	11	10	10	36	324
Átszállás	3	8	7	7	25	49
Időbeliség	4	10	8	8	30	144
Sebesség	11	9	6	9	35	289
Pontosság	8	6	11	11	36	324
Kényelem	2	5	4	3	14	16
Mentális jóérzés	7	4	5	5	21	9
Biztonság	1	1	9	6	17	1
Menetrend átlátható	10	7	1	4	22	16
Utazás előtti info	6	2	2	1	11	49
Utazás közbei info	9	3	3	2	17	1

Ahol $n=11$, $m=4$, $s=1222$, $R=24$, így $W=0.6943$.

41. Táblázat: Az IAHP módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 2-es szinten

<i>Kritérium</i>	Utas	Nem-utas	Önkormányzat	Interval AHP	R_i	$(R - R_i)^2$
Megközelítés	5	11	10	11	37	361
Átszállás	3	8	7	8	26	64

Időbeliség	4	10	8	7	29	121
Sebesség	11	9	6	9	35	289
Pontosság	8	6	11	10	35	289
Kényelem	2	5	4	2	13	25
Mentális jóézés	7	4	5	5	21	9
Biztonság	1	1	9	4	15	9
Mentrend átlátható	10	7	1	6	24	36
Utazás előtti info	6	2	2	1	11	49
Utazás közbeni info	9	3	3	3	18	0

Ahol $n=11$, $m=4$, $s=1252$, $R=24$, így $W=0.7114$.

42. Táblázat: Az új eljárás eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 3-as szinten

<i>Kritérium</i>	Utás	Nem-utás	Önkormányzat	Új eljárás	R_i	$(R - R_i)^2$
Megálló elérés	3	10	10	10	33	169
Megálló biztonság	6	5	9	7	27	49
Megálló kényelem	7	9	6	6	28	64
Átszállás szám	2	4	2	1	9	121
Tranzit idő	4	1	4	2	11	81
Járatgyakoróság	1	3	8	3	15	25
Járatszűnet	5	8	1	4	18	4
Utazási idő	9	7	3	8	27	49
Várakozási idő	10	6	7	9	32	144
Megálló elérési idő	8	2	5	5	20	0

Ahol $n=10$, $m=4$, $s=706$, $R=22$, így $W=0.5348$.

43. Táblázat: A 0-szint módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 3-as szinten

<i>Kritérium</i>	Utás	Nem-utás	Önkormányzat	0-szint	R_i	$(R - R_i)^2$
------------------	-------------	-----------------	---------------------	----------------	-------	---------------

Megálló elérés	3	10	10	10	33	169
Megálló biztonság	6	5	9	9	29	81
Megálló kényelem	7	9	6	7	29	81
Átszállás szám	2	4	2	2	10	100
Tranzit idő	4	1	4	3	12	64
Járatgyakoróság	1	3	8	4	16	16
Járatszünet	5	8	1	1	15	25
Utazási idő	9	7	3	6	25	25
Várakozási idő	10	6	7	8	31	121
Megálló elérési idő	8	2	5	5	20	0

Ahol $n=10$, $m=4$, $s=682$, $R=22$, így $W=0.5167$.

44. Táblázat: Az IAHP módszer eredményeinek Kendall rangkorrelációs értékei a 3-as szinten

<i>Kritérium</i>	Utazó	Nem-utazó	Önkormányzat	Interval AHP	R_i	$(R - R_i)^2$
Megálló elérés	3	10	10	9	32	144
Megálló biztonság	6	5	9	6	26	36
Megálló kényelem	7	9	6	8	30	100
Átszállás szám	2	4	2	4	12	64
Tranzit idő	4	1	4	1	10	100
Járatgyakoróság	1	3	8	3	15	25
Járatszünet	5	8	1	2	16	16
Utazási idő	9	7	3	7	26	36
Várakozási idő	10	6	7	10	33	169
Megálló elérési idő	8	2	5	5	20	0

Ahol $n=10$, $m=4$, $s=690$, $R=22$, így $W=0.5227$.

- III. Tézis. Kidolgoztam egy olyan, nemzetközileg is új konszenzus-alkotó eljárást közösségi közlekedési döntésekre, amely szemben a szubjektív, vagy a tárgyalásokon alapuló konszenzus teremtéssel, objektív módon állapítja meg a csoportos AHP modellben az egyes kitöltői csoportok súlyát, mégpedig olyan súlyok hozzárendelésével, amelyek a legkisebb vektor-távolságot biztosítják. Ehhez a következő konvex optimalizálási feladatot kell megoldani**

$$\min (\sqrt{(\alpha w_i^{(1)} - \beta w_i^{(2)})^2} + \sqrt{(\beta w_i^{(2)} - \gamma w_i^{(3)})^2} + \sqrt{(\gamma w_i^{(3)} - \alpha w_i^{(1)})^2}$$

azzal a korláttal, hogy a súlyok is 1-re normáltak.

III/1. Állításom bizonyítására teoretikus számpéldát, valamint valós közlekedési preferencia felmérési adatokat használtam, az eredményeket pedig az AIP WAMM, AIP WGMM, 0-szintű AHP és az IAHP ismert benchmark módszerek eredményeihez hasonlítottam. Az újonnan javasolt eljárás hatékonyabbnak bizonyult a benchmarkhoz képest abban a legfontosabb tekintetben, hogy a közlekedési preferencia-elemeket nagyobb korrelációval rendezte fontossági sorrendbe, ezáltal elfogadottabb közösségi közlekedés-fejlesztési döntést tesz lehetővé, vagyis a közlekedés-tervezés hatékonyabb erőforrás-allokációt valósíthat meg ezáltal.

A tézis eredményeihez kapcsolódó publikációim:

Duleba és Blahota, (2022), Journal of the Operational Research Society; Ghorbanzadeh et al, (2018), Sustainability; Moslem és Duleba, (2018) Pollack Periodica; Celikbilek et al, (2022) Evolving Systems, Duleba és Moslem (2019) Expert Systems with Applications; Duleba et al, (2021) European Transport Research Review; Duleba et al, (2022) Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.

5. Konszenzus keresés a közlekedés-fejlesztési felmérés bizonytalanságának a figyelembevételével: javaslat egy új fuzzy aggregálási eljárásra

Doktori disszertációm eddigi részeiben nem tértem ki egy nagyon lényeges fimonítására az AHP módszernek, amelynek célja, hogy figyelembe vegye az esetleges kitöltői bizonytalanságokat a végső súlypontszámok, és alternatíva pontszámok megállapításában. Amennyiben a kapott értékeket nem csak önmagukban álló adatokként (crisp numbers) kezeljük, hanem valamilyen elég kicsi környezetükben lévő potenciális értékeként is, azaz lefelé és felfelé is torzíthatónak vesszük, de csak bizonyos mértékig, fuzzy-fikáljuk azokat, vagyis a fuzzy számokkal való műveleteket kell alkalmaznunk rájuk.

5.1. Eddigi Fuzzy modellek a közlekedésben

A közösségi közlekedési fejlesztési döntésekben ennek a szemléletnek, illetve az ebből következő matematikai megközelítésnek kiemelt jelentősége van (Pamucar et al, 2020, Tumsekali et al, 2021), elsősorban a lakossági kitöltők esetében, akiknél feltételezhető a nem megfelelő informáltság (Deveci et al, 2019), valamint a motiváció hiánya (Kocak és Yercan, 2021) is a kérdőívekben szereplő adott válaszok tekintetében.

Annak ellenére, hogy az AHP megalkotója, Thomas L. Saaty sokáig ellenezte a Saaty-skála értékeinek fuzzy-fikálását, hiszen eleve fuzzy-nak tekintette a skálát, az utóbbi évtizedek bebizonyították, hogy a Fuzzy AHP-nek komoly relevanciája van. Ezt bizonyítja a jelenleg több mint 300.000 Google Scholar hivatkozás, és specifikusan a közlekedésben alkalmazott fuzzy AHP modellekre is több mint 79.000 találat adódik.

Vezető folyóiratokban számos Fuzzy AHP (FAHP) tanulmány jelent meg az utóbbi években közlekedési projektek, illetve fejlesztési döntések támogatására (Gumus, 2009; Sarkar és Biswas, 2021; Koohathongsumrit és Meethom, 2022; James et al, 2023).

Különböző formái ismertek a fuzzy számoknak, a közlekedéstudományban és a közlekedési projekteken az egyik legismertebb és leginkább alkalmazott verziója a trianguláris, azaz háromszög-alapú fuzzy megközelítés (Pekkaya et al, 2023). Ennek a rövid bemutatását végzem el a továbbiakban, majd rátérek az egyéni hozzájárulásomra a témakörben.

Míg a korábbiakban – a disszertációban eddig bemutatott összes modellben – feltételeztük, hogy a páros összehasonlítást végzők tökéletesen tisztában vannak mind a saját preferenciájukkal az adott kérdésben, mind a preferenciájuknak megfelelő pontszámmal a Saaty-skálán, addig a fuzzy megközelítésben nyelvi definíciót alkalmazunk a kitöltőknél, majd ezt konvertáljuk a matematika nyelvére. Abból indulunk tehát ki, hogy a nyelvi megfogalmazás tükrözi a valódi preferenciát, a számoknak pedig ezt a valós preferenciát kell közelíteniük.

45. Táblázat: A nyelvi skála konvertálása fuzzy számokká.

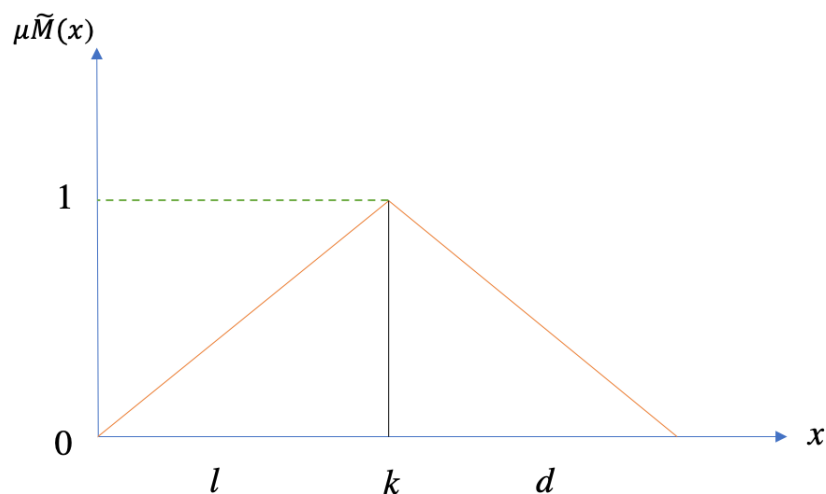
Saaty-skála értékek	Nyelvi skála	Fuzzy számok
9	Tökéletes	(8, 9, 10)
8	Domináns	(7, 8, 9)
7	Nagy mértékű	(6, 7, 8)
6	Jelentős	(5, 6, 7)
5	Jelentősebb	(4, 5, 6)
4	Preferált	(3, 4, 5)
3	Enyhén preferált	(2, 3, 4)
2	Gyengén preferált	(1, 2, 3)
1	Ugyanolyan	(1, 1, 1)

Nézzük ezek után, hogy miként képezzük a trianguláris fuzzy számokat, illetve, hogy miként tudunk velük műveleteket végezni!

M -nek a trianguláris fuzzy száma \tilde{M} a valós számok halmazán (R), ha a tagsági függvénye (membership function) $\mu_{\tilde{M}}(x): R \rightarrow [0, 1]$ pontosan a következő képlettel egyezik meg (5.1.):

$$(5.1.) \mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{k-l}, & l \leq x \leq k \\ \frac{d-x}{d-k}, & k \leq x \leq d \\ 0, & \text{egyéb esetben} \end{cases}$$

Az (5.1.)-es képletben, az l és a d értékek az also, illetve a felső küszöb-határát jelölik az \tilde{M} fuzzy számnak, a k pedig az úgynevezett modaláris értéke ugyanennek az \tilde{M} -nek. Ezt mutatja grafikusán az alábbi (9.) ábra.



9. ábra: A trianguláris fuzzy szám tagsági függvénye.

A trianguláris fuzzy számot a továbbiakban is $\tilde{M} = (l, k, d)$ -ként jelöljük. A fuzzy számoknak természetesen egyedi matematikai műveleti tulajdonságaik vannak, az alábbiakban a számunkra érdekes, legfontosabb trianguláris fuzzy operációs műveleteket írom le két trianguláris fuzzy szám $\tilde{M}_1 = (l_1, k_1, d_1)$ és $\tilde{M}_2 = (l_2, k_2, d_2)$ között a következő egyenletekkel (5.2.)–(5.6.). Ezeket az egyenleteket használni fogom a későbbiekben, az általam javasolt új konszenzus-keresési eljárás fuzzyfikált preferencia vektorok esetére.

Fuzzy számok összeadása \oplus

$$(5.2.) M_1 \oplus M_2 = (l_1, k_1, d_1) \oplus (l_2, k_2, d_2) = (l_1 + l_2, k_1 + k_2, d_1 + d_2)$$

Fuzzy számok szorzási művelete \otimes

$$(5.3.) \tilde{M}_1 \otimes M_2 = (l_1, k_1, d_1) \otimes (l_2, k_2, d_2) = (l_1 l_2, k_1 k_2, d_1 d_2) \text{ és } l_1, l_2 > 0; k_1, k_2 > 0; d_1 d_2 > 0$$

Fuzzy számok kivonása \ominus

$$(5.4.) \tilde{M}_1 \ominus \tilde{M}_2 = (l_1, k_1, d_1) \ominus (l_2, k_2, d_2) = (l_1 - d_2, k_1 - k_2, d_1 - l_2)$$

Fuzzy számok osztása \oslash

$$(5.5.) \tilde{M}_1 \oslash \tilde{M}_2 = (l_1, k_1, d_1) \oslash (l_2, k_2, d_2) = \left(\frac{l_1}{d_2}, \frac{k_1}{k_2}, \frac{d_1}{l_2} \right) \text{ és } l_1, l_2 > 0; k_1, k_2 > 0; d_1 d_2 > 0$$

Végül pedig a fuzzy számok reciprokának a képzése az alábbi művelettel történhet

$$(5.6.) M^{-1} = (l_1, k_1, d_1)^{-1} = \left(\frac{1}{d_1}, \frac{1}{k_1}, \frac{1}{l_1} \right) \text{ } l_1, l_2 > 0; k_1, k_2 > 0; d_1 d_2 > 0$$

Mivel a közlekedési fejlesztési preferenciák meghatározásához, valamint az AHP alkalmazásához fuzzy környezetben, szükségünk van a fuzzy páros összehasonlítási mátrixok megalkotására és a velük való műveletek végéhez, ezért ezt is definiáljuk. Legyen az \tilde{M} -ekből képzett páros összehasonlítási mátrix a következő felépítésű:

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{17} & \tilde{a}_{18} \\ \tilde{a}_{21} & 1 & \dots & \tilde{a}_{27} & \tilde{a}_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{a}_{71} & \tilde{a}_{72} & \dots & 1 & \tilde{a}_{78} \\ \tilde{a}_{81} & \tilde{a}_{82} & \dots & \tilde{a}_{87} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{17} & \tilde{a}_{18} \\ 1/\tilde{a}_{12} & 1 & \dots & \tilde{a}_{27} & \tilde{a}_{28} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1/\tilde{a}_{17} & 1/\tilde{a}_{27} & \dots & 1 & \tilde{a}_{78} \\ 1/\tilde{a}_{18} & 1/\tilde{a}_{28} & \dots & 1/\tilde{a}_{78} & 1 \end{bmatrix}$$

ahol $\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} \tilde{9}^{-1}, \tilde{8}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{6}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{4}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{2}^{-1}, \tilde{1}, \tilde{2}, \tilde{3}, \tilde{4}, \tilde{5}, \tilde{6}, \tilde{7}, \tilde{8}, \tilde{9}, & 1, i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$

a fuzzy súlyvektor pedig a sajátvektor módszer alapján számítható, és értéke: $\tilde{w}_i = (lw_i, kw_i, dw_i)$.

5.2. A javasolt konszenzus-meghatározás fuzzy környezetben

A negyedik tézisem azt mondja ki, hogy az előző (harmadik) tézisben javasolt konszenzus megállapítás (az egyes stakeholder csoportok optimális súlyait használva) alkalmas fuzzy környezetben is, vagyis fuzzy-fikált preferenciáknál is legalább olyan jó, mint a jelenleg ismert leghatékonyabb fuzzy aggregálási módszer. A korábban összehasonlítási alapul használt számtani vagy mértani összegző módszerek mellett a fuzzy környezetben sok esetben használt az entropikus konszenzus-teremtés (Yuan és Luo, 2019; Fu et al, 2020), amelyben az úgynevezett diverzifikációs érték határozza meg az egyes csoportok súlyait a végső döntésben, vagyis a preferenciák csoporton belüli entrópiája adja a csoportok súlyait. Az elkövetkezőekben bemutatom az entropikus aggregálás lényegét intuitív fuzzy környezetben, valamint bemutatom a negyedik tézisemet alátámasztó összehasonlítást az eddig ismert leghatékonyabb fuzzy aggregálási módszer és az általam javasolt módszer között (Duleba et al, 2022). A terület szakértői között ismert, hogy az intuitív fuzzy modellekben használt entropikus konszenzus-teremtés a preferencia-értékek közötti kapcsolatok teljes figyelembevételére alapul és teljesen adat-vezérelt (Jiang et al, 2018), vagyis nem igényel semmilyen extra információt a konszenzus-teremtéshez (hasonlóan az általam javasolt új módszerhez). Ezen felül az entropikus aggregálást nem befolyásolja a tagsági függvény, illetve a nem-tagsági függvény, ahogy a következőkben ismertetni fogom, így neutrális modellnek tekinthetjük, ezért valóban a leghatékonyabb fuzzy aggregálási módszer (Xia és Hu, 2012).

Mivel az összehasonlításhoz szükséges az intuitív fuzzy környezet definiálása, ezért ezzel kell kezdenem a módszerem validálását. Ezen felül a közlekedési felmérésekben is egyre népszerűbb ez a típusú fuzzy modell, így mindenképp hasznos a bemutatása. A tagsági és a nem-tagsági függvény értékek itt az előzőekben ismertetett trianguláris fuzzy modellnek megfelelően az intuitív fuzzy szám alsó, és felső korlátjait reprezentálják (lásd 5.1. definíció).

Legyen X egy nem üres halmaz. Egy intuitív fuzzy halmazt, I -t úgy képezünk X -ből, hogy

$$I = \{\langle x, \mu_I(x), \vartheta_I(x) : x \in X \rangle\}$$

ahol a függvények $\mu_I(x), \vartheta_I(x) : \rightarrow [0, 1]$ a tagsági, vagy a nem-tagsági értékét jelölik az x elemnek az X halmazból az I halmazba, és minden $x \in X$, valamint a $0 \leq \mu_I(x) + \vartheta_I(x) \leq 1$ feltételnek teljesülnie kell. Ezen felül, $\pi_I(x) = 1 - \mu_I(x) - \vartheta_I(x)$ az úgynevezett hezitációs foka (hesitant degree) x -nek I -ben. Minden intuitív fuzzy számra igaz, hogy a π_I is a $[0, 1]$ értéktartományba tartozik.

Tegyük fel, hogy $\tilde{X} = (\mu_x, \vartheta_x)$ és $\tilde{Y} = (\mu_y, \vartheta_y)$ két intuitív fuzzy szám. Ekkor a következő matematikai műveletekkel lehet számolni velük (Atanassov, 1986)

$$(5.7.) \bar{X} = (\vartheta_x, \mu_x)$$

$$(5.8.) \tilde{X} = \tilde{Y} \text{ ha } (\mu_x = \mu_y \text{ és } \vartheta_x = \vartheta_y)$$

$$(5.9.) \tilde{X} \geq \tilde{Y} \text{ ha } (\mu_x \geq \mu_y \text{ és } \vartheta_x \leq \vartheta_y)$$

$$(5.10.) \tilde{X} \leq \tilde{Y} \text{ Ha } (\mu_x \leq \mu_y \text{ és } \vartheta_x \geq \vartheta_y)$$

$$(5.11.) \tilde{X} \oplus \tilde{Y} = (\mu_x + \mu_y - \mu_x \mu_y, \vartheta_x \vartheta_y)$$

$$(5.12.) \tilde{X} \otimes \tilde{Y} = (\mu_x \mu_y, \vartheta_x + \vartheta_y - \vartheta_x \vartheta_y)$$

$$(5.13.) \alpha \tilde{X} = (1 - (1 - \mu_x)^\alpha, \vartheta_x^\alpha)$$

$$(5.14.) \tilde{X}^\alpha = (\mu_x^\alpha, 1 - (1 - \vartheta_x)^\alpha)$$

Mivel a negyedik tézis tárgya az aggregálás, nézzük, meg, hogyan aggregáljuk az intuitív fuzzy számokat definíció-szerűen, számtani, vagy mértani átlagokat alkalmazva!

Tegyük fel, hogy $\tilde{X} = (\mu_x, \vartheta_x)$ egy intuitív fuzzy szám (IFN). Az Intuitív Fuzzy Súlyozott Geometriai Operátor (IFWG) és az Intuitív Fuzzy Súlyozott Számtani Operátor (IFWA) a következőképpen határozható meg, ha figyelembe vesszük a még a Bevezetésben kikötött AHP feltételt, hogy a súlyvektorok 1-re normáltak (ebben nincs különbség a fuzzy és nem fuzzy AHP között) $w_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)$; $w_i \in [0,1]$; $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.:

$$(5.15.) IFWG(\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_n) = \left\{ \prod_{i=1}^n \mu_{x_i}^{w_i}, 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \vartheta_{x_i})^{w_i} \right\}$$

$$(5.16.) IFWA(\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_n) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{x_i})^{w_i}, \prod_{i=1}^n \vartheta_{x_i}^{w_i} \right\}$$

A bevezetőben ismertetett AHP eljárás intuitív fuzzy megfelelőjéhez egy lépést még definiálni kell, mégpedig azért, mert a konzisztencia számításához (amelyet az AHP-ben a konzisztencia-hányados, vagyis a CR reprezentál) csak az eredeti AHP-skála használható, így defuzzyfikálni kell a már fuzzy értékeket (\tilde{X}) a következő formula alapján:

$$(5.17.) Sc = Score(\tilde{X}) = \frac{2\mu_{\tilde{X}} - \vartheta_{\tilde{X}}}{2}$$

A továbbiakban bemutatom azt, hogy milyen modellel lehetséges azt a három szintű, közösségi közlekedés-fejlesztési preferenciákat gyűjtő és elemző hierarchikus döntéstámogató modellt intuitív fuzzy megközelítésben felépíteni és alkalmazni, amelyet a korábbiakban is használtam. **Természetesen úgy – igazodva a negyedik téziséhez – hogy három különböző stakeholder csoport konszenzusára törekszünk, mégpedig az általam javasolt csoport-súly optimalizálást összehasonlítva a széles körben használt (mainstream) entropikus konszenzus-teremtéssel.** A modell teoretikus leírása után egy valós közlekedés-fejlesztésre vonatkozó felmérés alapján (ez alapjaiban hasonló az 1-es ábrán látható, és eddig végig alkalmazott hierarchikus modellhez, kiegészítve egy költség-központú döntési ággal) megvizsgálom a javasolt módszer hatékonyságát az entropikus modellhez képest.

Először is nézzük, hogy az intuitív fuzzy módszernél hogyan konvertáljuk az AHP-ben használt Saaty-skála értékeit! Ne feledjük, hogy a kitöltőknek ugyanúgy a Saaty-skálát vagy akár a nyelvi leírás skáláját kell használniuk, mint a korábbi, nem-fuzzy felméréseknél, a konverziót

az elemző hajtja végre (a kitöltő dolga nem nehezedik az intuitív fuzzy módszer alkalmazásakor)!

46. Táblázat: Intuitív fuzzy kifejezések az összehasonlításokhoz

Nyelvi leírás	Saaty-skála	μ (tagság- érték)	ν (nem-tagsági érték)
Abszolút alacsony fontosság (AL)	9	0.1	0.9
Nagyon alacsony fontosság (VL)	7	0.15	0.75
Alacsony fontosság (L)	5	0.25	0.6
Enyhén alacsony fontosság (SL)	3	0.4	0.5
Ugyanolyan fontosság (EE)	1	0.5	0.4
Enyhén nagyobb fontosság (SH)	1/3	0.6	0.25
Nagy fontosság (H)	1/5	0.6	0.15
Nagyon nagy fontosság (VH)	1/7	0.75	0.15
Abszolút nagy fontosság (AH)	1/9	0.90	0.1

Igazodva a disszertációm korábbi modelljeihez, a következő jelöléseket vezetem be.

Legyen n : a vizsgált döntési kritériumok száma (i és $j= 1, \dots, n$), m : a stakeholder csoportok száma ($g_l = g_1, g_2, \dots, g_m$), s_{g_l} : az adott résztvevők száma az egyes stakeholder csoportokban ($k = 1, 2, \dots, s_{g_l}$), $s_{g_l}^k$: a k – adik résztvevő a g_l csoportban, p : a döntési probléma megoldásához szükséges páros összehasonlítási mátrixok száma a teljes kitöltői számra vonatkozóan. Adódik, hogy $p=kxm$.

A közösségi közlekedési kérdőívek kitöltésének tapasztalatai szerint ha lehetséges, a nyelvi leírást kell kérnünk a kitöltőktől, ugyanis elsősorban a nem szakértő kitöltőket megzavarják az esetleges törtek a Saaty-skálában. Így a modellbe a nyelvi leírásokat építettük be doktoranduszommal és Fatma Gundogdu kutatótársammal, és ezek konverzióját is szerepeltettük.

A nyelvi leírások alapján a következő intuitív fuzzy páros összehasonlítási mátrixok keletkeztek:

$$(5.18.) \left(\tilde{R}_{ijk}^{g_l} = (\tilde{r}_{ijk})_{n \times n}^{g_l} \right) \text{ minden kitöltőre } (s_{g_l}^k) \text{ a } (g_l) \text{ csoportban.}$$

Ezeket az előző táblázat alapján kovertáltuk a Saaty-skála értékeire:

$$(5.19.) \tilde{R}_{ijk}^{g_l} \sim R_{ijk}^{g_l} = (r_{ijk})_{n \times n}^{g_l}$$

A következő lépésben az AHP alapján (1.6.-os képlet már a bevezetőben mutatta) a geometriai átlagot használva aggregáljuk a Saaty-skála értékeket. Felhívom a figyelmet arra, hogy itt nem a fuzzy értékeket használjuk az aggregáláshoz, hiszen ahogy azt már az előzőekben említettem, a konzisztenciát csak a Saaty-skálára tudjuk mérni a CR-rel.

$$(5.20.) R_{ij}^{g_l} = (r_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \left[\sqrt[s_{g_l}]{\prod_{k=1}^{s_{g_l}} (r_{ijk})_{\text{nxn}}^{g_l}} \right] \text{ minden } i, j = 1, \dots, n \text{ és } g_l = g_1, g_2, \dots, g_m$$

A mátrixok reciprok értékeit az alábbi képlettel határozhatjuk meg minden esetben.

$$(5.21.) (r_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \frac{1}{(r_{ji})_{\text{nxn}}^{g_l}}$$

A sajátvektor módszert pedig ugyanúgy alkalmazhatjuk, mint azt az 1.3.-as képletben már leírtam.

$$(5.22.) (R_{ij}^{g_l} - \lambda_{\max} \cdot I)w_i = 0$$

Szintén, a Saaty-skála értékekre lefolytathatjuk a konzisztencia-ellenőrzést a CR kiszámításával, valamint a 0,1-es küszöb figyelembevételével.

A kritériumiok lokális (csoporton belüli) és globális (a csoportokat figyelembe vevő) súlypontoszámainak kiszámításához azonban vissza kell térnünk a fuzzyfikált intuitív értékekhez, ugyanúgy az entropikus aggregáláshoz szükséges operátorok is csak fuzzy környezetben alkalmazhatók. Használjuk tehát az Intuitív Fuzzy Súlyozott Geometriai Operátort (IFWG)!

$$(5.23.) (\tilde{r}_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \langle [\mu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l}, v_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l}] \rangle = \left\langle \left[\prod_{k=1}^{s_{g_l}} (\mu_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right], \left[1 - \prod_{k=1}^{s_{g_l}} (1 - v_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right] \right\rangle$$

ahol a k -adik kitöltő súlya $w_{g_l}^k = \frac{1}{s_{g_l}}$ és $\sum_{k=1}^{s_{g_l}} w_{g_l}^k = 1$ minden $\forall g_l$ -re.

A reciprok értékeket ezekre az intuitív fuzzy számokra a következőképpen számítjuk:

$$(5.24.) (\tilde{r}_{ji})_{\text{nxn}}^{g_l} = \langle [v_{\tilde{r}_{ji}}^{g_l}, \mu_{\tilde{r}_{ji}}^{g_l}] \rangle$$

A csoporton belüli lokális kritérium-súlyokhoz, igazodva az entropikus aggregálás szabályaihoz (Jiang et al, 2018) az Intuitív Fuzzy Súlyozott Számtani Operátort (IFWA) kell alkalmazni.

$$(5.25.) (\tilde{r}_i)^{g_l} = \langle [\mu_{\tilde{r}_i}^{g_l}, v_{\tilde{r}_i}^{g_l}] \rangle =$$

$$(\tilde{r}_i)^{g_l} = \left\langle \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right], \left[\prod_{j=1}^n (v_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right] \right\rangle$$

ahol $w_j = \frac{1}{n}$ és $(j = 1, 2, \dots, n)$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Ahogy korábban is említést tettem róla, a fuzzy multiplikátorok alkalmazása után defuzzifikáljuk az értékeket, így nem-fuzzy végső súlyok állapíthatóak meg, hiszen a kitöltői értékeket fuzzynek vesszük a kitöltői bizonytalanság miatt, a végső súlypontszámokat azonban valódi, 1-re normált számoknak szeretnénk megállapítani. Ezért:

defuzzifikáljuk az $(\tilde{r}_i)^{g_l}$ fuzzy számokat azért, hogy valódi súlyvektor értékeket kaphassunk a következőképpen:

$$(5.26.) r_i^{g_l} = \text{Score}(\tilde{r}_i^{g_l}) = \frac{2\mu_{\tilde{r}_i}^{g_l} - v_{\tilde{r}_i}^{g_l}}{2}$$

Majd normalizáljuk az $r_i^{g_l}$ értékeket annak érdekében, hogy megkaphassuk a közlekedés-fejlesztési modellünk mindhárom szintjére a végső súlyvektor értékeket minden stakeholder csoport esetében

$$(5.27.) \bar{r}_i^{g_l} = \frac{r_i^{g_l}}{\sum_{i=1}^n r_i^{g_l}} \quad \text{minden } \forall g_l, g_l = g_1, g_2, \dots, g_m\text{-re.}$$

Végül pedig, ahogy a korábbi téziseknél, valamint a módszertani bevezetőben is jeleztem, az egyes kritériumok végső pontszámait az adja, hogy az alsóbb döntési szinteken lévő kritériumok súlypontszámát megszorozzuk az eggyel felette lévő kapcsolódó (döntési ág-képző) kritérium súlypontszámával mind a második, mind a harmadik szinten. Tehát a végső kritérium-súlyok:

$$(5.28.) w_i^{g_l} = \bar{r}_i^{g_l}(i \in 2 - \text{dik szint}) \times \bar{r}_i^{g_l}(i \in 3 - \text{dik szint})$$

ahol $w_i^{g_l}$ az adott kritérium végső súlypontszáma az adott stakeholder csoporton belül.

Ezt a műveletet tehát elvégezzük stakeholder csoportonként és keressük ezen csoportok konszenzusát az összes döntési kritériumra. Van tehát, ahogy már korábban is definiáltam n : számú kritériumunk a döntési problémában $(i = 1, 2, \dots, n)$, s_{g_l} : számú értékelőnk minden g_l stakeholder csoportban (az általam vizsgált közösség-fejlesztési problémánál pontosan 3 ilyen csoportot különböztettem meg, ezek konszenzusos kritérium súlyait szeretnénk meghatározni).

Az entropikus megközelítésben, akárcsak az általam javasolt vektor-távolság minimalizációnál (lásd a harmadik tézisémet) az egyes csoportok súlyozott átlaga adja a konszenzus súlypontszámot minden kritériumra. Az entropikus alapú aggregálásnál azonban ennek meghatározása a következőképpen történik: kiszámoljuk csoportonként a súlyozott súlypontszámát az adott kritériumnak

$$(5.29.) w_i^{ave.} = \frac{\sum_{g_l=1}^m w_i^{g_l} \times s_{g_l}}{\sum_{g_l=1}^m s_{g_l}}$$

$g_l=1, \dots, m$ minden stakeholder csoportra. Valamint számoljuk ki az entrópiát minden csoportra (E_{g_l}):

$$(5.30.) \text{Entrópia} = E_{g_l} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{\ln(2)} (w_i^{g_l} \times \ln(w_i^{g_l}) + w_i^{ave.} \times \ln(w_i^{ave.})) \right)$$

Ezek egyedi értékek lesznek az egyes csoportokra, minden stakeholder csoportra ki tudjuk számolni az úgynevezett diverzifikációs értéket (div_{g_l}), amely mutatja az egyes súlypontoszámok kvázi szórását az adott csoportra vonatkozólag.

$$(5.31.) div_{g_l} = n - E_{g_l}$$

Ha normalizáljuk az előbb definiált diverzifikációs értéket, az entropikus aggregálásban meg is kapjuk az egyes stakeholder csoportok súlyát.

$$(5.32.) \bar{w}_{g_l} = \frac{div_{g_l}}{\sum_{g_l=1}^m div_{g_l}}$$

Így minden $i=1, \dots, n$ kritériumra megkaphatjuk a végső, konszenzuális súlypontoszámot a következőképpen:

$$(5.33.) \sum_{g_l=1}^m \bar{w}_{g_l} \times w_i^{g_l}$$

Az általam javasolt, a harmadik tézisben részletesen bemutatott súly-megállapítási eljárás eljárás megegyezik a korábbi leírással. Ezt fogom tehát összehasonlítani egy valós felmérés adatain az entropikus aggregálással fuzzy számokat használva.

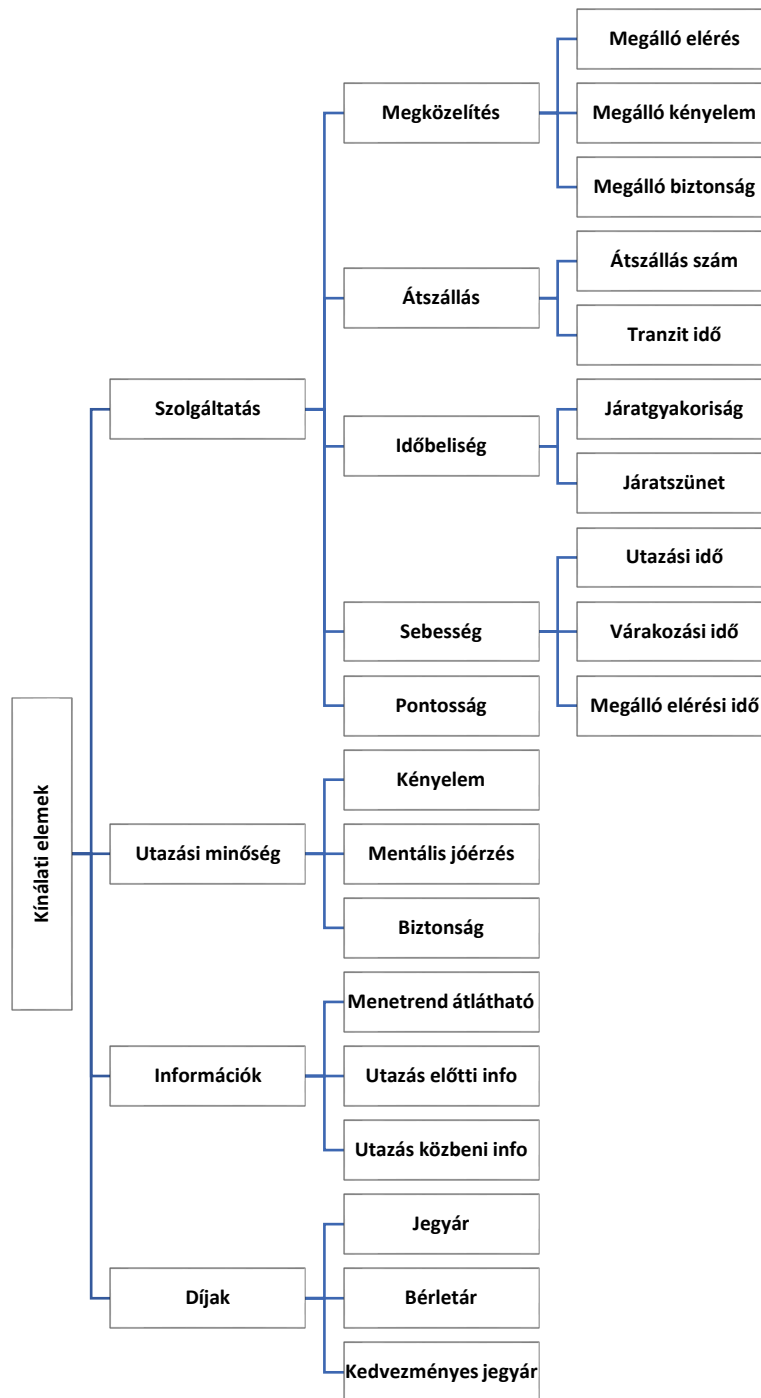
5.3. A javasolt konszenzus eljárás fuzzy környezetben, egy valós közlekedési preferencia-felmérésen tesztelve

Ahmad Alkharabsheh doktoranduszommal egy 425 fős, nagy mintás AHP felmérést készítettünk Jordánia fővárosában, Amman-ban 2019 január 4-től január 31-ig. Három stakeholder csoportot kérdeztünk közösségi közlekedési preferenciákról, 400 fő utast (az inkonzisztens válaszok kiszűrése után maradt ennyi a létszámuk), 20 fő közlekedési szakértőt, valamint 5 fő önkormányzati, közlekedéssel foglalkozó hivatalnokot. Az utasok csoportjánál ügyeltünk arra, hogy a minta demográfiai összetétele minél inkább hasonlítson a főváros demográfiai jellegzetességeire, ezt a legfiatalabb (14 év alatti) és legidősebb (65 év feletti) korcsoporton kívül meg is tudtuk valósítani. Az alábbi táblázat mutatja a 400 fős utasminta jellemzőit.

47. Táblázat: Amman és a felmérés mintájának demográfiai jellemzői 2019-ben

Korcsoport	Amman népességi százaléka	A kitöltői minta népességi százaléka	Az utas kitöltők száma
0-14	34.4	0	0
15-24	19.8	31.9	128
25-34	16.4	26.5	106
35-44	12.7	20.5	82
45-54	8.7	14	56
55-64	4.4	7.1	28
65+	3.6	0	0
Összesen	100%	100%	400

Némileg eltértünk az 1-es ábrán bemutatott közlekedés-fejlesztési kritériumoktól, de csak annyiban, hogy azokat kiegészítettük az első döntési szinten az utazási árakkal, a második döntési szinten pedig ennek a tovább-bontásával jegyárra, bérletárra, és kedvezményes jegyárra. A következő ábra mutatja a kiegészített, közösségi közlekedésre vonatkozó hierarchikus kritérium-rendszert.



10. ábra: A közösségi buszközlekedés kínálati elemeinek díj-megközelítéssel bővített modellje

A doktori disszertáció terjedelmi keretei nem engedik meg, hogy mindhárom szint, mindhárom stakeholder csoportjának minden kritériumra vonatkozó pontszám-kalkulációját bemutassam mind az entropikus, mind az általam javasolt távolság-minimalizáláson alapuló aggregálási technikára. A számítási eljárás és a gondolatmenet megértése érdekében közlöm az első szint kritériumainak súlypontszám számítását, majd az entropikus és az új módszer számított csoport-súlyait, végül pedig az entropikus és az új eljárás kritérium pontszámait és azok

rangsorát. Ennek a két rangsornak az összehasonlításával igazolom az általam javasolt aggregálási eljárás jogosultságát.

48. Táblázat: Az 1-es szinten szereplő kritériumok súlypontoszámainak számítása a közlekedési szakértők csoportjának esetében

Kritérium	Szolgáltatás		Utazási minőség		Információk		Díjak		Aggregált eredmény		Defuzzyfikált értékek	Normalizált értékek
	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν		
Szolgáltatás	0.50	0.40	0.31	0.58	0.19	0.76	0.41	0.48	0.36	0.54	0.09	0.0875
Utazási minőség	0.58	0.31	0.50	0.40	0.33	0.58	0.44	0.47	0.47	0.43	0.26	0.2446
Információk	0.76	0.19	0.58	0.33	0.50	0.40	0.34	0.56	0.57	0.34	0.40	0.3776
Díjak	0.48	0.41	0.47	0.44	0.56	0.34	0.50	0.40	0.50	0.40	0.31	0.2902

A bemutatott eljárás alapján számított entropikus csoport-súlyok:

49. Táblázat: Az entropikus eljárás csoport-súlyai

Csoportok	E_{g_i}	div_{g_i}	\bar{w}_i
Közlekedési szakértők	11.74857	16.2514	0.345
Utások	12.09712	15.9029	0.338
Önkormányzati képviselők	13.12263	14.8773	0.316

A csoportok súlyának felhasználásával pedig a következő konszenzuális végső súlypontoszámok adódtak.

50. Táblázat: Az entropikus végső súlyok és rangsor

Szint	Kritérium	Végső súlyok	Helyezés szintenként
1-es szint	Szolgáltatás	0.183537	4
	Utazási minőség	0.279317	1
	Információk	0.262492	3
	Díjak	0.274654	2
2-es szint	Megközelítés	0.019261	14
	Átszállás	0.047536	9
	Időbeliség	0.053657	8

	Sebesség	0.040073	12
	Pontosság	0.023009	13
	Kényelem	0.045677	10
	Mentális jóérzés	0.071201	6
	Biztonság	0.162439	1
	Menetrend átlátható	0.064255	7
	Utazás előtti info	0.125454	3
	Utazás közbeni info	0.072784	5
	Jegyár	0.042762	11
	Bérletár	0.095979	4
	Kedvezményes jegyár	0.135913	2
3-as szint	Megálló elérés	0.001801	10
	Megálló kényelem	0.00968	7
	Megálló biztonság	0.00778	8
	Átszállás szám	0.018916	4
	Tranzit idő	0.02862	1
	Járatgyakoriság	0.025333	3
	Járatszünet	0.028325	2
	Utazási idő	0.006183	9
	Várakozási idő	0.017605	5
	Megálló elérési idő	0.016286	6

Nézzük most, hogy az általam javasolt új eljárás milyen optimális súlyokat határozott meg az egyes stakeholder csoportoknak!

51. Táblázat: Az új eljárásból számított szintenkénti csoport-súlyok

Szint	Szakértők súlya	Utazók súlya	Önkormányzat súlya
1-es szint	0.324	0.343	0.333
2-es szint Szolgáltatás ág	0.303	0.347	0.350
2-es szint Utazási minőség ág	0.322	0.337	0.341
2-es szint Információk ág	0.329	0.335	0.336

2-es szint Díjak ág	0.328	0.319	0.353
3-as szint Megközelítés ás	0.347	0.340	0.313
3-as szint Átszállás ág	0.323	0.333	0.344
3-as szint Időbeliség ág	0.332	0.333	0.334
3-as szint Sebesség ág	0.334	0.333	0.332

A táblázatban szereplő súlyok használatával (felhívom arra a figyelmet, hogy az egyes hierarchikus döntési ágaknál mindig újra kellett futtatni az optimalizációt, hiszen a vizsgált n-dimenziós vektortérben ezek új vektorokat jelöltek ki, amelyeknek saját 1-re normált optimalizált súlyuk van a 3-dik tézis logikájának megfelelően) kiszámíthatjuk a végső konszenzuális súlypontszámokat.

52. Táblázat: Az általam javasolt eljárás végső konszenzus súlyai és rangsora

		Optimalizált súlyok	szintenkénti helyezések
Szintek	Kritérium	Végső súly	Helyezés
1-es szint	Szolgáltatás	0.188	4
	Utazási minőség	0.238	3
	Információk	0.259	2
	Díjak	0.274	1
2-es szint	Megközelítés	0.017	14
	Átszállás	0.045	10
	Időbeliség	0.058	8
	Sebesség	0.044	11
	Pontosság	0.024	13
	Kényelem	0.039	12
	Mentális jóérzés	0.060	6
	Biztonság	0.139	1

	Menetrend átláthatóság	0.059	7
	Utazás előtti információk	0.118	3
	Utazás közbeni információk	0.082	5
	Jegyár	0.047	9
	Bérletár	0.096	4
	Kedvezményes jegyar	0.132	2
3-as szint	Megálló elérés	0.002	10
	Megálló kényelem	0.007	9
	Megálló biztonság	0.008	7
	Átszállás szám	0.016	6
	Tranzit idő	0.029	2
	Járatgyakorosság	0.026	3
	Járatszünet	0.032	1
	Utazási idő	0.007	8
	Várakozási idő	0.019	4
	Megálló elérési idő	0.018	5

Ezen értékek ismeretében össze lehet hasonlítani a két különböző eljárásból adódó súlypontoszámokat és rangsorokat. Mivel az általam javasolt módszer validációjához igazán a kardinális korreláció járul hozzá (az ordinális mindössze a rangsorok hasonlóságát vizsgálja, az értékek hasonlóságára nem vonatkozik), a második tézisemben bemutatott módszerek közül most a vektor-kompatibilitás vizsgálatot alkalmazom. Következésképp a Garuti-index számítást végeztem el a két aggregálási eljárás súlyvektorai, mint konszenzuális preferencia-vektorok között. Ne feledjük, hogy az entropikus aggregálás széleskörű szakirodalommal rendelkezik és benchmark-nak tekinthető. Az eredményeket mutatja a következő táblázat.

53. Táblázat: A két konszenzus eljárás összehasonlítása a Garuti-index-szel

Kritérium	Entropikus konszenzus	Új eljárás konszenzusa	G index
Szolgáltatás	0.1835	0.1880	0.1814
Utazási minőség	0.2793	0.2380	0.2204
Információk	0.2625	0.2590	0.2573
Díjak	0.2747	0.2740	0.2737
		G indexek összege	0.9327
Megközelítés	0.0193	0.0170	0.0160
Átszállás	0.0475	0.0450	0.0438
Időbeliség	0.0537	0.0580	0.0516
Sebesség	0.0401	0.0440	0.0383
Pontosság	0.0230	0.0240	0.0225
Kényelem	0.0457	0.0390	0.0361
Mentális jóérzés	0.0712	0.0600	0.0553
Biztonság	0.1624	0.1390	0.1290
Menetrend átláthatóság	0.0643	0.0590	0.0566
Utazás előtti info	0.1255	0.1180	0.1145
Utazás közbeni info	0.0728	0.0820	0.0687
Jegyár	0.0428	0.0470	0.0408
Bérletár	0.0960	0.0960	0.0960
Kedvezményes jegyár	0.1359	0.1320	0.1301
		G indexek összege	0.8993
Megálló elérés	0.0112	0.0122	0.0108
Megálló kényelem	0.0603	0.0427	0.0364
Megálló biztonság	0.0485	0.0488	0.0483
Átszállás szám	0.1178	0.0976	0.0892
Tranzit idő	0.1783	0.1768	0.1761
Járatgyakoróság	0.1578	0.1585	0.1574
Járatszünnet	0.1764	0.1951	0.1680
Utazási idő	0.0385	0.0427	0.0366
Várakozási idő	0.1097	0.1159	0.1067
Megálló elérési idő	0.1015	0.1098	0.0976

Ahogy az egyes szintek Garuti értékeiből is látható, az új eljárás nagyon erős kompatibilitást mutat az entropikus aggregálásból adódó súlypontoszámokkal. Garuti 70% fölötti kompaibilitási érték fölött tekinti erősen hasonlóknak a vizsgált vektorokat, esetünkben pedig 90% körüli értékeket kaptunk minden szintre. Különösen figyelemre méltó az, hogy a kompatibilitás kitar az alsó hierarchia szinteken is, hiszen a korábban már jelzett döntési szint kapcsolódások miatt a felső szinten lévő súlypontoszám eltérések általában felerősödnek a második, de még inkább a harmadik szinten. Az általam javasolt aggregálás azonban szintenként újraoptimalizál, ezért az esetleges felső szintű eltérést nem hordozza magával, amire a bemutatott valós közlekedés-fejlesztési felmérés világított rá.

IV. Tézis. Megállapítottam, hogy a vektor-távolságok minimalizációjának elve a konszenzus-teremtésre működik fuzzy környezetben is, amely nagyon lényeges a közlekedési felméréseknél az esetleges bizonytalan kitöltői válaszok kezelése miatt. A valós közösségi közlekedési felmérés eredményeiből kiderült az is, hogy a fuzzy környezetben alkalmazott

$$(\tilde{r}_i)^{g_l} = \left\langle \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right], \left[\prod_{j=1}^n (v_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right] \right\rangle$$

számítási átlagon alapuló aggregátort, valamint a

$$(\tilde{r}_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \left\langle \left[\prod_{k=1}^{s_{g_l}} (\mu_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right], \left[1 - \prod_{k=1}^{s_{g_l}} (1 - v_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right] \right\rangle$$

mértani aggregátort is használó entropikus konszenzus eljárással is versenyképes az általam javasolt vektor-távolság minimalizálás. Ezáltal egy olyan új, fuzzy környezetben is alkalmazható konszenzus-teremtést javaslok, amely a közlekedési stakeholder csoportok számára az ideális objektív súlyokat tudja meghatározni egy közlekedés-fejlesztési döntésben.

A tézis eredményeihez kapcsolódó publikációim:

Duleba et al (2022), Annals of Operations Research; Duleba et al (2021), Informatica; Gudogdu et al (2021), Applied Soft Computing; Moslem és Duleba (2019), Urban Science; Duleba és Moslem (2019) Expert Systems with Applications; Duleba et al (2021) European Transport Research Review; Duleba et al (2022) Transportation Research Interdisciplinary Perspectives

6. Összefoglalás- Új tudományos eredmények összefoglalása

6.1. Új tudományos eredmények

1. Tézis:

Kidolgoztam egy olyan, az eredeti AHP eljárásnál jóval kevesebb páros összehasonlítást igénylő (azaz kisebb költséggel és kitöltési igénnyel járó) módszert, amely kis, és nagy kitöltői mintán egyaránt hatékonyan alkalmazható közösségi közlekedés-fejlesztési preferenciák felmérésére.

1./1. Lényeges, nemzetközileg is új eredmény, hogy a $u(c_{kp}) = u(c_{ke}) + \frac{u(c_{ke+1}) - u(c_{ke})}{\gamma_{ke+1} - \gamma_{ke}} (\gamma_{kp} - \gamma_{ke})$ képlet alkalmazásával fel tudtam oldani azt az erős feltételt, hogy a Parsimonious AHP kizárólag a döntési struktúra alsó szintjén, azaz az alternatívákra használható. Ezáltal olyan közlekedés-fejlesztési döntéseket is támogathatunk a módszerrel, mint a menetrend-átalakítások, megálló-áthelyezések vagy az új járművek beszerzési szükségessége.

1./2. Ezen felül a $nu_{ckp} = \frac{u_{ckp}}{\sum_{p=1}^g u_{ckp}}$ és $w_j = \sum_{p=1}^b nu_{ckp}$ képletekkel egy olyan belső ellenőrzési (immanens) eljárást vezettem be, amely alkalmas a Parsimonious döntési szint AHP szintekhez való hasonlítására és így egyfajta érzékenység-vizsgálatra.

1./3. Állításaimat két valós, közösségi közlekedési rendszer fejlesztésének döntéstámogatására használt felméréssel igazoltam.

2. Tézis:

Kidolgoztam két olyan új eljárást, amely hatékonyabb a nemzetközi szakirodalomban jelenleg alkalmazott AIP WAMM és AIP WGMM technikáknál, valamint a nemrégiben felmerült CPVP technikánál is hatékonyabb abból a szempontból, hogy az egyéni közlekedési preferenciákból olyan csoport-preferenciát alkot, amely jobban korrelál az összes egyéni preferenciához. Az általam elnevezett, és kidolgozott EDBAM, azaz Euklideszi távolság-minimalizáción alapuló eljárás képlete:

$$f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot d_E(w^{(k)}, x))$$

$$d_E(w^{(k)}, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i^{(k)} - x_i)^2}$$

és az Aitchison-távolságot használó ADBAM

$$f(x) = \sum_{k=1}^m (a_k \cdot d_A(w^{(k)}, x))$$

$$d_A(w^{(k)}, x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\log\left(\frac{w_i^{(k)}}{g(w^{(k)})}\right) - \log\left(\frac{x_i}{g(x)}\right) \right]^2}$$

aggregálási technikák.

2./1. Állításmat kétféle szimulációval és valós közösségi közlekedési felméréstől származó adatokkal is bizonyítottam. Következésképpen az új aggregációval a csoportpreferencia jobban tükrözi az egyes kitöltők preferenciáját, mint bármely más, a jelenlegi nemzetközi kutatásokban használt AHP technika.

3. Tézis:

Kidolgoztam egy nemzetközi szempontból is új konszenzus-alkotási eljárást csoportos közlekedési AHP döntésekre, amely szemben a szubjektív, vagy a tárgyalásokon alapuló konszenzus teremtéssel, objektív módon állapítja meg egy AHP modellben az egyes kitöltői csoportok súlyát, mégpedig olyan súlyok hozzárendelésével, amelyek a legkisebb vektor-távolságot biztosítják. Ehhez a következő konvex optimalizálási feladatot kell megoldani

$$\min \left(\sqrt{(\alpha w_i^{(1)} - \beta w_i^{(2)})^2} + \sqrt{(\beta w_i^{(2)} - \gamma w_i^{(3)})^2} + \sqrt{(\gamma w_i^{(3)} - \alpha w_i^{(1)})^2} \right)$$

azzal a korláttal, hogy a súlyok is 1-re normáltak.

3./1. Állításm bizonyítására teoretikus számpéldát, valamint valós közlekedési preferencia felmérési adatokat használtam, az eredményeket pedig az AIP WAMM, AIP WGMM, 0-szintű AHP és az IAHP ismert benchmark módszerek eredményeihez hasonlítottam. Az újonnan javasolt eljárás hatékonyabbnak bizonyult a benchmarkhoz képest abban a legfontosabb tekintetben, hogy a közlekedési preferencia-elemeket nagyobb korrelációval rendezte fontossági sorrendbe, ezáltal elfogadottabb közösségi közlekedés-fejlesztési döntést tesz lehetővé, vagyis a közlekedés-tervezés hatékonyabb erőforrás-allokációt valósíthat meg ezáltal.

4. Tézis:

Megállapítottam, hogy a vektor-távolságok minimalizációjának elve a konszenzus-teremtésre működik fuzzy környezetben is, amely nagyon lényeges a közlekedési felméréseknél az esetleges bizonytalan kitöltői válaszok kezelése miatt. A valós közösségi közlekedési felmérés eredményeiből kiderült az is, hogy a fuzzy környezetben alkalmazott

$$(\tilde{r}_i)^{g_l} = \left\langle \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right], \left[\prod_{j=1}^n (v_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right] \right\rangle$$

számítási átlagon alapuló aggregátort, valamint a

$$(\tilde{r}_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \left\langle \left[\prod_{k=1}^{s_{g_l}} (\mu_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right], \left[1 - \prod_{k=1}^{s_{g_l}} (1 - \nu_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right] \right\rangle$$

mértani aggregátort is használó entropikus konszenzus eljárással is versenyképes az általam javasolt vektor-távolság minimalizálás. Ezáltal egy olyan új, fuzzy környezetben is alkalmazható konszenzus-teremtést javaslok, amely a közlekedési stakeholder csoportok számára az ideális objektív súlyokat tudja meghatározni egy közlekedés-fejlesztési döntésben.

6.2. A tudományos eredmények gyakorlati hasznosíthatósága

Minden eredményem inspirációját egy-egy felmerülő gyakorlati kérdés adta, így belátható, hogy a gyakorlati hasznosíthatóság viszonylag könnyen bizonyítható minden esetben.

A közösségi közlekedési igények és preferenciák felmérésénél egyértelmű cél, hogy maga a felmérés minél kisebb költség, és időráfordítással járjon, miközben az eredmények megbízhatósága biztosítva van. Az első tézisemben egy ilyen általam javasolt eljárást mutattam be, amely közösségi közlekedés-fejlesztésre direkt módon, egyéb, közlekedéssel vagy logisztikával foglalkozó döntés esetében pedig közvetett módon felhasználható.

Szintén a gyakorlatban is előforduló probléma egy csoport tagjainak konszenzuális preferenciáját megtalálni, vállalatoknál erre szolgálnak a meeting-ek, a közlekedésben pedig bármely utas-felmérésnél felmerül ennek az igénye. A második tézis ebben nyújt segítséget. Ide tartozik még a Sustainable Urban Mobility Plan (SUMP)-ok európai uniós projektek esetében történő közösségi igény-felmérés, amelynek hatékonyságához jelentősen hozzájárul ez az eredményem.

Az egyes közlekedési stakeholder csoportok konszenzusa lényeges praktikus igény abból a szempontból, hogy a döntésben lehetőleg figyelembe vegyük az egyes csoportok érdekeit, az általam kínált objektív megoldás pedig kiváltja a hosszadalmas és költséges tárgyalásos/alkudozásos döntéshozatali eljárást, amelyek a közlekedési projekteket több esetben eddig végigkísérték. A harmadik tézis által, a konszenzusos közös preferenciára törekvéssel hosszútávon fenntarthatóbb közlekedési fejlesztések valósulhatnak meg azzal, hogy minden érintett csoport preferenciáit a lehető legteljesebb mértékben figyelembe vesszük a javasolt módszer által.

Negyedik tézisemnél ugyanez válhat lehetővé azzal a kiegészítéssel, hogy a végső eredmény figyelembe vesz egy újabb gyakorlati szempontot, nevezetesen a közlekedési felmérésekben résztvevő válaszadók esetleges bizonytalanságát vagy részleges információhiányát. A javasolt optimalizációs eljárás ennek a kiküszöbölését is elvégzi az eddig ismert lehető legnagyobb mértékben, így járulva hozzá egy pontosabb és megbízhatóbb közlekedés-fejlesztési döntés meghozatalához.

Leginkább a megvalósult és benyújtott közlekedési témájú projektekkal lehet bizonyítani a tudományos eredmények gyakorlati hasznosíthatóságát. A CE 25 Movecit projekt keretein

belül (Interreg Central Europe Program) budapesti ingázók közlekedési forma választásánál tudtuk használni az 1. Tézis redukciós tulajdonságát, ennek eredményét ki is publikáltuk a European Transport Research Review folyóiratban. Jelenleg bírálat alatt álló ERC projektünkben (Proposal SEP-210892340, Proposal No. 101115834) pedig mind a 2. Tézis új aggregálási megoldását, mind a 3. és 4. Tézis konszenzus-teremtését alkalmazni fogjuk egy közlekedési applikáció fejlesztése során.

Fontosabb publikációk jegyzéke

Könyvek, könyvfejezetek

Curtis, C., Scheurer, J. (2016). *Planning for Public Transport Accessibility*. London, UK, Routledge. doi: 10.4324/9781315600758

Pekkaya, M., Keles, N., Cakir, F., S. (2023). Freight Village Efficiency Criteria Evaluation via Fuzzy Multi-criteria Decision-Making Methods. In: Sahoo, L., Senapati, T., Yager, R.R. (szerk.) *Real Life Applications of Multiple Criteria Decision Making Techniques in Fuzzy Domain*. Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol 420. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-19-4929-6_30

Saaty, T., L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, USA, McGraw-Hill

Saaty, T., L. (1996). *The Analytic Network Process*, Pittsburgh, USA, RWS Publications

Folyóiratcikkek

Abastante, F., Corrente, S., Greco, S., Ishizaka, A., Lami, I. (2019). A new parsimonious AHP methodology: Assigning priorities to many objects by comparing pairwise few reference objects. *Expert Systems with Applications*, 127, 109-120. doi: 10.1016/j.eswa.2019.02.036

Aczél, J., Alsina, C. (1986). On synthesis of judgements. *Socio-Economic Planning Sciences*, 20(6), 333-339. doi: 10.1016/0038-0121(86)90044-3

Aitchison, J., Barceló-Vidal, C., Martín-Fernández, J., A., Pawlowsky-Glahn, V. (2000). Logratio Analysis and Compositional Distance. *Mathematical Geology*, 32, 271-275. doi: 10.1023/A:1007529726302

Amenta, P., Ishizaka, A., Lucadamo, A., Marcarelli, G., Vyas, V. (2020). Computing a common preference vector in a complex multi-actor and multi-group decision system in Analytic Hierarchy Process context. *Annals of Operations Research*, 284, 33-62. doi: 10.1007/s10479-019-03258-3

Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87–96. doi: 10.1016/S0165-0114(86)80034-3

Awad, J., Jung, C. (2022). Extracting the planning elements for sustainable urban regeneration in Dubai with AHP (Analytic Hierarchy Process). *Sustainable Cities and Society*, 76, 103496. doi: 10.1016/j.scs.2021.103496

Bansal, P., Kessels, R., Krueger, R., Graham, D., J. (2022). Preferences for using the London Underground during the COVID-19 pandemic. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 160, 45-60. doi: 10.1016/j.tra.2022.03.033

Barron, F., H., Barrett, B., E. (1996). The efficacy of SMARTER — Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking. *Acta Psychologica*, 93(1-3), 23-36. doi: 10.1016/0001-6918(96)00010-8

- Basak, I., Saaty, T., L. (1993). Group decision making using the analytic hierarchy process. *Mathematical Computers Modelling*, 17(4-5), 105-109. doi: 10.1016/0895-7177(93)90179-3
- Békefi, Z., Kiss, L., N., Tánczos, K. (2003). Multicriteria Analysis of the financial feasibility of transport infrastructure projects in Hungary. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 41(1), 105-126. doi: 10.1080/03155986.2003.11732671
- Bouraima, M., B., Alimo, P., K., Agyeman, S., Sumo, P., D., Lartey-Young, G., Ehebrechet, D. (2023). Africa's railway renaissance and sustainability: Current knowledge, challenges and prospects. *Journal of Transport Geography*, 106, 103487. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2022.103487
- Bozóki, S. (2008). Solution of the least squares method problem of pairwise comparison matrices. *Central European Journal of Operations Research*, 16(4), 345-358. doi: 10.1007/s10100-008-0063-1
- Bozoki, S., Rapcsak, T. (2008). On Saaty's and Koczkodaj's inconsistencies of pairwise comparison matrices. *Journal of Global Optimization*, 42, 157-175. doi: 10.1007/s10898-007-9236-z
- Bozóki, S., Fülöp, J., Rónyai, L. (2010). On optimal completion of incomplete pairwise comparison matrices. *Mathematical and Computer Modelling*, 52(1-2), 318-333. doi: 10.1016/j.mcm.2010.02.047
- Brans, J., P., Vincke, P., Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The Promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228-238. doi: 10.1016/0377-2217(86)90044-5
- Chen, K., Kou, G., Tarn, J., Song, Y. (2015). Bridging the gap between missing and inconsistent values in eliciting preference from pairwise comparison matrices. *Annals of Operations Research*, 235(1), 155-175. doi: 10.1007/s10479-015-1997-z
- Chirillo, C., Xu, R. (2011). Dynamic discrete choice models for transportation. *Transport Reviews*, 31(4), 473-494. doi: 10.1080/01441647.2010.533393
- Cho, Y., G., Cho, K., T. (2008). A loss function approach to group preference aggregation in AHP. *Computers and Operations Research*, 35(3), 884-892. doi: 10.1016/j.cor.2006.04.008
- Ciardiello, F., Genovese, A., Luo, S., Sgalamboro, A. (2021). A game-theoretic multi-stakeholder model for cost allocation in urban consolidation centres. *Annals of Operations Research* in press. doi: 10.1007/s10479-021-04013-3
- Corrente, S., Greco, S., Ishizaka, A. (2016). Combining Analytic Hierarchy Process and Choquet integral within Non Additive Robust Ordinal Regression. *Omega*, 61, 2-18. doi: 10.1016/j.omega.2015.07.003
- Csató, L. (2013). Ranking by pairwise comparisons for Swiss-system tournaments. *Central European Journal of Operations Research*, 21, 783-803. doi: 10.1007/s10100-012-0261-8

- De Gruyter, C., Currie, G., Truong L., T., Naznin F. (2019). A meta-analysis and synthesis of public transport customer amenity valuation research. *Transport Reviews*, 39(2), 261-283. doi: 10.1080/01441647.2018.1461708
- De Ona, J., De Ona, R. (2015). Quality of Service in Public Transport Based on Customer Satisfaction Surveys: A Review and Assessment of Methodological Approaches. *Transportation Science*, 49(3), 605-622. doi: 10.1287/trsc.2014.0544
- De Vos, J., Mokhtarian, P., L., Schwanen, T., Van Acker V., Witlox, F. (2016). Travel mode choice and travel satisfaction: bridging the gap between decision utility and experienced utility. *Transportation*, 43, 771-796. doi: 10.1007/s11116-015-9619-9
- Dell'Olio, L., Ibeas, A., Cecin, P. (2011). The quality of service desired by public transport users. *Transport Policy*, 18(1), 217-227. doi: 10.1016/j.tranpol.2010.08.005
- Deveci, M., Öner, S., C., Canitez, F., Öner, M. (2019). Evaluation of service quality in bus transportation using interval-valued intuitionistic fuzzy QFD methodology. *Research in Transportation Business and Management*, 33, 100387. doi: 10.1016/j.rtbm.2019.100387
- Dong, H., Ma, S., Jia, N., Tian, J. (2021). Understanding public transport satisfaction in post COVID-19 pandemic. *Transport Policy*, 101, 81-88. doi: 10.1016/j.tranpol.2020.12.004
- Espinosa-Aranda, J., L., Garcia-Rodenas, R., Ramirez-Flores, M., C., Lopez-Garcia, M., L., Angulo, E. (2015). High-speed railway scheduling based on user preferences. *European Journal of Operational Research*, 246(3), 772-786. doi: 10.1016/j.ejor.2015.05.052
- Esztergár-Kiss, D., Csiszár, Cs. (2016). Utazástervező rendszerek értékelési szempontjaihoz tartozó súlyszámok meghatározása Fuzzy AHP alapú módszerrel. *Közlekedéstudományi Szemle*, 66(6), 35-44. http://real.mtak.hu/49323/1/5_37_u.pdf
- Farkas, A. (2007). The analysis of the principal eigenvector of pairwise comparison matrices. *Acta Polytechnica Hungarica*, 4(2), 99-116. http://www.epa.hu/02400/02461/00010/pdf/EPA02461_acta_polytechnica_hungarica_2007_02_098-116.pdf
- Feng, H., Grifoll, M., Yang, Z., Zheng, P., & Martin-Mallofre, A. (2020). Visualization of container throughput evolution of the Yangtze River Delta multi-port system: the ternary diagram method. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102039. doi: 10.1016/j.tre.2020.102039
- Floden, J., Woxenius, J. (2021). A stakeholder analysis of actors and networks for land transport of dangerous goods. *Research in Transportation Business and Management*, 41, 100629. doi: 10.1016/j.rtbm.2021.100629
- Földes, D., Csiszár, Cs. (2016). Útvonal értékelő eljárás személyre szabott utastájékoztatáshoz. *Közlekedéstudományi Szemle*, 65(4), 42-57. http://real.mtak.hu/39830/1/Foldes_Csiszar_cikk_u.pdf

- Frey, V., van de Rijdt, A. (2021). Social Influence Undermines the Wisdom of the Crowd in Sequential Decision Making. *Management Science*, 67(7), 4273-4286. doi: 10.1287/mnsc.2020.3713
- Fu, S., Zhou, H., Xiao, Y.-Z. (2020). Optimum Selection of Energy Service Company Based on Intuitionistic Fuzzy Entropy and VIKOR Framework. *IEEE Access*, 8, 186572–186584. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030651
- Garuti, C., E. (2017). Reflections on scales of measurement, not measurement of scales. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 9(3). doi: 10.13033/ijahp.v9i3.522
- Gass, S. I., Rapcsák, T. (1998). A note on synthesizing group decisions. *Decision Support Systems*, 22(1), 59-63. doi: 10.1016/S0167-9236(96)00061-9
- Gonzalez-Feliu, J., Pronello, C., Grau, S. (2018). Multi-stakeholder collaboration in urban transport: state-of-the-art and research opportunities. *Transport*, 33(4), 1079-1094. doi: 10.3846/transport.2018.6810
- Gumus, A., T. (2009). Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 4067-4074. doi: 10.1016/j.eswa.2008.03.013
- Ha, J., Lee, S., Ko, J. (2020). Unraveling the impact of travel time, cost, and transit burdens on commute mode choice for different income and age groups. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 147-166. doi: 10.1016/j.tra.2020.07.020
- Hawas, Y., E., Hassan, M., N., Abulibdeh, A. (2016). A multi-criteria approach of assessing public transport accessibility at a strategic level. *Journal of Transport Geography*, 57, 19-34. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2016.09.011
- Ho, C., Q., Mulley, C., Hensher, D., A. (2020). Public preferences for mobility as a service: Insights from stated preference surveys. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 131, 70-90. doi: 10.1016/j.tra.2019.09.031
- Hosseini, M., Moore, J., Almaliki, M., Shahri, A., Phalp, K., Ali, R. (2015). Wisdom of the Crowd within enterprises: Practices and challenges. *Computer Networks*, 90, 121-132. doi: 10.1016/j.comnet.2015.07.004
- Imre, S., Celebi, D. (2017). Measuring Comfort in Public Transport: A case study for İstanbul. *Transportation Research Procedia*, 25, 2441-2449. doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.261
- Ishizaka, A. (2012)a. Clusters and pivots for evaluating a large number of alternatives in AHP. *Pesquisa Operacional*, 32(1), 87-102. doi: 10.1590/S0101-74382012005000002
- Ishizaka, A., Pearman, C., Nemerey, P. (2012)b. AHPSort: an AHP-based method for sorting problems. *International Journal of Production Research*, 50(17), 4767-4784. doi: 10.1080/00207543.2012.657966

- Ishizaka, A., Labib, A. (2011) c. Selection of new production facilities with the Group Analytic Hierarchy Process Ordering method. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7317-7325. doi: 10.1016/j.eswa.2010.12.004
- James, A. T., Asjad, M., Kumar, G., Shukla, V., C., Arya, V. (2023). Analyzing barriers for implementing new vehicle scrap policy in India. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 114, 103568. doi: 10.1016/j.trd.2022.103568
- Jiang, W., Wei, B., Liu, X., Li, X., Zheng, H. (2018). Intuitionistic Fuzzy Power Aggregation Operator Based on Entropy and Its Application in Decision Making. *International Journal of Intelligent Systems*. doi: 10.1002/int.21939
- Keeney, R., L. (2009). The foundations of collaborative group decisions. *International Journal of Collaborative Engineering*, 1(1-2), 231-237. doi: 10.1504/IJCE.2009.027438
- Kendall, M. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1-2), 81-93. doi: 10.2307/2332226
- Kent, J., L. (2022). The use of practice theory in transport research. *Transport Reviews*, 42(2), 222-244. doi: 10.1080/01441647.2021.1961918
- Keserű, I., Coosemans, T., Macharis, C. (2021). Stakeholders' preferences for the future of transport in Europe: Participatory evaluation of scenarios combining scenario planning and the multi-actor multi-criteria analysis. *Futures*, 127, 102690. doi: 10.1016/j.futures.2020.102690
- Kim, Y, Kim, E-J., Jang, S., Kim, D-K. (2021). A comparative analysis of the users of private cars and public transportation for intermodal options under Mobility-as-a-Service in Seoul. *Travel Behaviour and Society*, 24, 68-80. doi: 10.1016/j.tbs.2021.03.001
- Kocak, S., T., Yercan, F. (2021). Comparative cost-effectiveness analysis os Arctic and international shipping routes: A Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *Transport Policy*, 114, 147-164. doi: 10.1016/j.tranpol.2021.08.015
- Koohathongsumrit, N., Meethom, W. (2022). A Fuzzy Decision-Making Framework for Route Selection in Multimodal Transportation Networks. *Engineering Management Journal*, 34(4), 689-704. doi: 10.1080/10429247.2022.2027205
- Krauss, K., Krail, M., Axhausen, K., W. (2022). What drives the utility of shared transport services for urban travellers? A stated preference survey in German cities. *Travel Behaviour and Society*, 26, 206-220. doi: 10.1016/j.tbs.2021.09.010
- Lai, Y-J., Liu, T-Y, Hwang, C-L. (1994). TOPSIS for MODM. *European Journal of Operational Research*, 76(3), 486-500. doi: 10.1016/0377-2217(94)90282-8
- Lee, M., D., Zhang, S., Shi, J. (2011). The wisdom of the crowd playing The Price Is Right. *Memory and Cognition*, 39, 914-923. doi: 10.3758/s13421-010-0059-7

- Li, Q., Liu, R., Zhao, J., Liu, H-C. (2022). Passenger satisfaction evaluation of public transport using alternative queuing method under hesitant environment. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 26(3), 330-342. doi: 10.1080/15472450.2020.1859375
- Liang, F., Verhoeven, K., Brunelli, M., Rezaei, J. (2021). Inland terminal location selection using the multi-stakeholder best-worst method. *International Journal of Logistics Research and Applications*, in press. doi: 10.1080/13675567.2021.1885634
- Macharis, C., De Witte, A., Ampe, J. (2009). The multi-actor, multi-criteria analysis methodology (MAMCA) for the evaluation of transport projects: Theory and practice. *Journal of Advanced Transportation*, 43(2), 183-202. doi:10.1002/atr.5670430206
- Macharis, C., Bernardini, A. (2015). Reviewing the use of Multi-Criteria Decision Analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach. *Transport Policy*, 37, 177-186. doi: 10.1016/j.tranpol.2014.11.002
- Marcucci, E., Gatta, V, Le Pira, M. (2018). Gamification design to foster stakeholder engagement and behavior change: An application to urban freight transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 119-132. doi: 10.1016/j.tra.2018.08.028
- Marquez, L., Cantillo, V., Arellana, J. (2014). How are comfort and safety perceived by inland waterway transport passengers? *Transport Policy*, 36, 46-52. doi: 10.1016/j.tranpol.2014.07.006
- Nagy, O., B., Csipkés, M., Balogh, P. (2018). A közösségi közlekedés résztvevőinek preferenciái. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*, 3(3), 158-170. doi: 10.21791/ijems.2018.3.13.
- Nalmpantis, D., Roukouni, A., Genitsaris, E., Stamelou, A., Naniopoulos, A. (2019). Evaluation of innovative ideas for Public Transportat proposed by citizens using Multi-Criteria Decision Analysis. *European Transport Research Review*, 11(22), doi: 10.1186/s12544-019-0356-6
- Nelder, J., A., Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4), 308-313. doi: 10.1093/comjnl/7.4.308
- O'Connell, J., Warnock-Smith, D. (2013). An investigation into traveler preferences and acceptance levels of airline ancillary revenues. *Journal of Air Transport Management*, 33, 12-21. doi: 10.1016/j.jairtraman.2013.06.006
- Ossadnik, W., Schinke, S., Kaspar, H., R. (2016). Group aggregation techniques for Analytic Hierarchy Process and Analytic Network Process: A comparative analysis. *Group Decision and Negotiation*, 25, 421-457. doi: 10.1007/s10726-015-9448-4
- Pamucar, D., Deveci, M., Canitez, F., Bozanic, D. (2020). A fuzzy full consistency method Dombi-Bonferroni model for prioritizing transportation demand management measures. *Applied Soft Computing*, 87, 105952. doi: 10.1016/j.asoc.2019.105952

- Paneque, M., P., Bierlaire, M., Gendron, B., Azadeh, S., S. (2021). Integrating advanced discrete choice models in mixed integer linear optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 26-49. doi: 10.1016/j.trb.2021.02.003
- Pedroso, G., Bermann, C., Sanches-Pereira, A. (2018). Combining the functional unit concept and the analytic hierarchy process method for performance assessment of public transport options, *Case studies on Transport Policy*, 6(4), 722-736. doi: 10.1016/j.cstp.2018.09.002
- Qiuchen, W., Jannicke, H., B., Sebastiaan, M. (2022). The complexity of stakeholder influence on MaaS: A study on multi-stakeholder perspectives in Shenzhen self-driving mini-bus case. *Research in Transportation Economics*, 94, 101070. doi: 10.1016/j.retrec.2021.101070
- Ramanathan, R., Ganesh, L. (1994). Group preference aggregation methods employed in AHP: an evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages. *European Journal of Operational Research*, 79(2), 249-265. doi: 10.1016/0377-2217(94)90356-5
- Redman, L., Friman, M., Garling, T., Hartig, T. (2013). Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. *Transport Policy*, 25, 119-127. doi: 10.1016/j.tranpol.2012.11.005
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57. doi: 10.1016/j.omega.2014.11.009
- Roman, C., Martin, J., C. (2014). Integration of HSR and air transport: Understanding passengers' preferences. *Transportation Research Part F: Logistics and Transportation Review*, 71, 129-141. doi: 10.1016/j.tre.2014.09.001
- Saaty, T., L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281. doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5
- Saaty, T., L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26. doi: 10.1016/0377-2217(90)90057-1
- Saif, M., A., Zefreh, M., M., Török, A. (2019). Public Transport Accessibility: A Literature Review. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 47(1), 36-43. doi: 10.3311/PPtr.12072
- Sarkar, B., Biswas, A. (2021). Pythagorean fuzzy AHP-TOPSIS integrated approach for transportation management through a new distance measure. *Soft Computing*, 25, 4073-4089. doi: 10.1007/s00500-020-05433-2
- Solomon, M. (2006). Groupthink versus „The wisdom of the crowds”. The social epistemology deliberation and dissent. *The Southern Journal of Philosophy*, 44(1), 28-42. doi: 10.1111/j.2041-6962.2006.tb00028.x
- Spearman C.E., (1987). The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology* 100(3-4), 441-471. doi: 10.2307/1422689

- Szádoczki, Z., Bozóki, S., Juhász, P., Kadenko, S., Tsyganok, V. (2022). Incomplete pairwise comparison matrices based on graphs with average degree approximately 3. *Annals of Operations Research*, in press. doi: 10.1007/s10479-022-04819-9
- Tánczos, K., Török, Á. (2007). The linkage between climate change and energy consumption of Hungary in the road transportation sector. *Transport*, 22(2), 134-138. doi: 10.1080/16484142.2007.9638112
- Thompson, K., Schofield, P. (2007). An investigation of the relationship between public transport performance and destination satisfaction. *Journal of Transport Geography*, 15(2), 136-144. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2006.11.004
- Torabi, F., K., Araghi, Y., van Oort, N., Hoogendoorn, S. (2022). Passengers preferences for using emerging modes as first/last mile transport to and from a multimodal hub case study Delft Campus railway station. *Case Studies on Transport Policy*, 10(1), 300-314. doi: 10.1016/j.cstp.2021.12.011
- Tumsekcali, E., Ayyildiz, E., Taskin, A. (2021). Interval valued intuitionistic fuzzy AHP-WASPAS based public transportation service quality evaluation by a new extension of SERVQUAL model: P-SERVQUAL 4.0. *Expert Systems with Applications*, 186, 115757. doi: 10.1016/j.eswa.2021.115757
- Van de Honert, R., C. (2001). Decisional Power in Group Decision Making: A Note on the Allocation of Group Members' Weights in the Multiplicative AHP and SMART. *Group Decision and Negotiation*, 10, 275-286. doi: 10.1023/A:1011201501379
- Van Lierop, D., El-Geneidy, A. (2018). Is having a positive image of public transit associated with travel satisfaction and continued transit usage? An exploratory study of bus transit. *Public Transport*, 10, 241-256. doi: 10.1007/s12469-018-0175-5
- Xia, M., Xu, Z. (2012). Entropy/cross entropy-based group decision making under intuitionistic fuzzy environment. *Information Fusion*, 13(1), 31-47. doi: 10.1016/j.inffus.2010.12.001
- Xiahou, X., Tang, L., Yuan, J., Zuo, J., Li, Q. (2022). Exploring social impacts of urban rail transit PPP projects: Towards dynamic social change from the stakeholder perspective. *Environmental Impact Assessment Review*, 93, 106700. doi: 10.1016/j.eiar.2021.106700
- Yaya, L., H., P., Fortia, M., F., Canals, C., S. (2015). Service quality assessment of public transport and the implication role of demographic characteristics. *Public Transport*, 7, 409-428. doi: 10.1007/s12469-014-0099-7
- Ye, S., Chen, Q., Tang, Y. (2023). Anger between bus drivers and passengers or among passengers: Development of a bus passenger anger scale (BPAS) and a bus driver anger scale (BDAS). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 167, 103563. doi: 10.1016/j.tra.2022.103563

Yuan, J., Luo, X. (2019). Approach for multi-attribute decision making based on novel intuitionistic fuzzy entropy and evidential reasoning. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 643–654. doi: 10.1016/j.cie.2019.06.031

Konferenciakkek

Huang, H. (2022). Involve multiple stakeholder groups to reach a sustainable consensus in mobility projects. The meeting of the EURO Working Group on Multiple Criteria Decision Aiding, Belgrade, 7/04/22 → 9/04/22. <https://mcda93.ekof.bg.ac.rs/>

Roy, B. (1990). *The Outranking Approach and the Foundations of Electre Methods*. Readings in Multiple Criteria Decision Aid. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-75935-2_8

Tézispontokhoz kapcsolódó saját publikációk jegyzéke

Könyvek, könyvfejezetek**Folyóiratcikkek**

Celibilek, Y., Moslem, S., Duleba, Sz. (2022). A combined grey multi criteria decision making model to evaluate public transportation systems. *Evolving Systems*, kiadás alatt doi: 10.1007/s12530-021-09414-0

Duleba, Sz., Mishina, T., Shimazaki, Y. (2012). A dynamic analysis on public bus transport's supply quality by using AHP. *Transport*, 27(3), 268-275. doi: 10.3846/16484142.2012.719838

Duleba, Sz., Shimazaki, Y., Mishina, T. (2013). An analysis on the connections of factors in a public transport system by AHP-ISM. *Transport*, 28(4), 404-412. doi: 10.3846/16484142.2013.867282

Duleba, Sz., Moslem, S. (2018). Sustainable urban transport development with stakeholder participation, an AHP-Kendall model: A case study of Mersin. *Sustainability*, 10(10), 3647. doi: 10.3390/su10103647

Duleba, Sz., Moslem, S. (2019). Examining Pareto-optimality in Analytic Hierarchy Process on real data: An application in public transport service development. *Expert Systems with Applications*, 116, 21-30. doi: 10.1016/j.eswa.2018.08.049

Duleba, Sz., Moslem, S., Esztergár-Kiss, D. (2021). Estimating commuting modal split by using the Best-Worst Method (BWM). *European Transport Research Review*, 13, 29. doi: 10.1186/s12544-021-00489-z

Duleba Sz., Gundogdu, F., K., Moslem, S. (2021). Interval-Valued Spherical Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method to Evaluate Public Transportation Development. *Informatica*, 32(4), 661-686. doi: 10.15388/21-INFOR451

Duleba, Sz., Moslem, S. (2021). User Satisfaction Survey on Public Transport by a New PAHP based Model. *Applied Sciences*, 11(21), 10256. doi: 10.3390/app112110256

Duleba, Sz., Tettamanti, T., Nyerges, Á., Szalay, Zs.(2021). Ranking the Key Areas for Autonomous Proving Ground Development Using Pareto Analytic Hierarchy Process. *IEEE Access*, 9, 51214-51230. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3064448

Duleba, Sz. (2022). Introduction and comparative analysis of the multi-level parsimonious AHP methodology in a public transport development decision problem. *Journal of the Operational Research Society*, 73:2, 230-243, doi: 10.1080/01605682.2020.1824553

Duleba, Sz., Celibilek, Y., Moslem, S., Esztergár-Kiss, D. (2022): Application of grey analytic hierarchy process to estimate mode choice alternatives: A case study from Budapest.

Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 13, 100560. doi:
10.1016/j.trip.2022.100560

Duleba, Sz., Alkharabsheh, A., Gundogdu, F. (2022). Creating a common priority vector in intuitionistic fuzzy AHP: a comparison of entropy-based and distance-based models. *Annals of Operations Reserach*, 318, 163-187. doi: 10.1007/s10479-021-04491-5

Duleba, Sz., & Blahota, I. (2022). Determining optimal group weights for consensus creation in AHP for three conflicting stakeholder groups by vector distance minimization. *Journal of the Operational Research Society*, 73(7), 1633-1648. doi: 10.1080/01605682.2021.1918588

Duleba, Sz., Szádoczki, Zs. (2022). Comparing aggregation methods in large-scale group AHP: Time for the shift to distance-based aggregation. *Expert Systems with Applications*, 196, 116667. doi: 10.1016/j.eswa.2022.116667

Ghorbanzadeh, O., Moslem, S., Blashke, T., Duleba, Sz. (2019). Sustainable urban transport planning considering different stakeholder groups by an Interval-AHP decision support model. *Sustainability*, 11(1), 9. doi: 10.3390/su11010009

Gundogdu, F., K., Duleba, Sz, Moslem, S., Aydin, S. (2021): Evaluating public transport service quality using picture fuzzy analytic hierarchy process and linear assignment model. *Applied Soft Computing*, 100, 106920. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106920

Hamadneh, J., Duleba, Sz, Estergár-Kiss, D. (2022). Stakeholder viewpoints analysis of the autonomous vehicle industry by using multi-actors multi-criteria analysis. *Transport Policy*, 126, 65-84. doi: 10.1016/j.tranpol.2022.07.005

Moslem, S., & Duleba, Sz. (2018). Application of AHP for evaluating passenger demand for public transport improvements in Mersin, Turkey. *Pollack Periodica*, 13(2), 10.1556/606.2018.13.2.7

Moslem, S., & Duleba, Sz. (2019). Sustainable Urban Transport Development by Applying a Fuzzy-AHP Model: A Case Study from Mersin, Turkey. *Urban Science*, 3(2), 55. doi: 10.3390/urbansci3020055

Szádoczki, Zs., & Duleba, Sz. (2022). Distance-based aggregation in Group AHP. *Journal of Decision Systems*, 31, 98-106. doi: 10.1080/12460125.2022.2070952

Konferenci cikkek

Mellékletek

Algorithm 1.: A távolság alapú aggregálási módszerek szimulációs algoritmus

Input: (n, m) pair of parameters, $w^{(k)}$ individual preference vectors for $k = 1, \dots, m$, $x \in \mathbb{R}^n$ initial test point (in our case $x = (1/n, 1/n, \dots, 1/n)$), $\alpha = 1, \beta = 0.5, \gamma = 2$ and $\delta = 0.5$ parameters and the $f(\cdot)$ function (the sum of weighted distances).

Output: w , the aggregated priority vector

1. Create $n + 1$ test points, the original x , and n other with a fixed step along each dimension
2. Order the current test points: $f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_n) \leq f(x_{n+1})$
Set the iterative counter l to 1

Compute the sample standard deviation of $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_{n+1})$ denoted by σ_l

3. Calculate the centroid of x_1, x_2, \dots, x_n denoted by \bar{x}
4. Compute the reflected point: $x_r = \bar{x} + \alpha(\bar{x} - x_{n+1})$
5. **If** $f(x_1) \leq f(x_r) < f(x_n)$ **then**
replace test point x_{n+1} by x_r

go to step 9

6. **If** $f(x_r) < f(x_1)$ **then**
Calculate the expanded point: $x_e = \bar{x} + \gamma(x_r - \bar{x})$

7. **If** $f(x_e) < f(x_r)$ **then**
replace test point x_{n+1} by x_e

go to step 9

else

replace test point x_{n+1} by x_r

go to step 9

8. Here certainly $f(x_r) \geq f(x_n)$
Compute the contracted point: $x_c = \bar{x} + \beta(x_{n+1} - \bar{x})$

If $f(x_c) < f(x_{n+1})$ **then**
replace test point x_{n+1} by x_c

go to step 9

else

replace all test points, except the best, x_1 as follows

$x_i = x_1 + \delta(x_i - x_1)$ for $i = 2, 3, \dots, n + 1$

go to step 9

9. Order the current (new) test points: $f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_n) \leq f(x_{n+1})$

Increase the iterative counter: $l = l + 1$

Compute σ_l , the sample standard deviation of $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_{n+1})$

If $\sigma_l < 0.00001$ or $l = 500$ then

go to step 10

else

go to step 3

10. Save $w = x_1$ and Exit.

Return: w

Algorithm 2.: A szimulációs eljárás algoritmus

Input: (n, m) pair of parameters.

Output: The number of times when a method provided the highest Kendall W of 1000 cases for AIP WAMM, AIP WGMM, EDBAM, and ADBAM.

1. Generate m different n -dimensional random vectors, which are normalized to one (individual preference vectors).
2. Apply the AIP WAMM, AIP WGMM, EDBAM and ADBAM methods on the individual vectors (detailed in Section 2) resulting in the following priority vectors: $w^{AIP\ WAMM}$, $w^{AIP\ WGMM}$, w^{EDBAM} and w^{ADBAM} .
3. Collect the rankings provided by the individual decision-makers and by the consensual priority ranking calculated according to the appropriate method in the following matrices: $M^{AIP\ WAMM}$, $M^{AIP\ WGMM}$, M^{EDBAM} and M^{ADBAM} .
4. The tie-corrected Kendall coefficient of concordance measure is calculated for the four matrices and those methods that provide the highest Kendall W are saved.
5. Steps 1-4 are repeated 1000 times.

Return: A (4-dimensional) vector contains the number of times when AIP WAMM, AIP WGMM, EDBAM, and ADBAM provided the highest Kendall W of 1000 cases.

Szimulációs adatok alacsony dimenziójú preferencia vektorok esetére ($n = 2, 3$)

m	n=2				n=3			
	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM
5	1000	1000	820	781	904	875	766	714
10	1000	1000	904	865	881	856	728	632
100	1000	1000	841	785	867	844	655	570
200	1000	1000	810	761	854	834	677	577
300	1000	1000	817	756	863	836	654	563

400	1000	1000	830	782	864	843	667	596
500	1000	1000	810	765	858	836	682	570
600	1000	1000	813	766	853	820	652	573
700	1000	1000	828	763	853	854	655	557
800	1000	1000	824	776	862	859	652	569
900	1000	1000	818	768	869	842	641	555
1000	1000	1000	819	772	867	868	628	534

Szimulációs adatok közepes dimenziójú preferencia vektorok esetére ($n = 4, 5$)

	n=4				n=5			
m	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM
5	774	716	643	502	663	550	554	388
10	781	740	622	506	674	555	478	313
100	738	700	513	411	670	527	432	244
200	751	692	536	365	672	561	402	255
300	742	684	505	388	652	487	409	248
400	724	684	493	386	647	512	381	220
500	753	686	525	374	661	516	417	237
600	749	686	495	333	626	544	449	221
700	751	701	519	344	661	509	404	215
800	751	698	491	373	663	539	427	208
900	745	681	504	349	662	507	378	235
1000	738	701	510	376	641	532	389	206

Szimulációs adatok közepesnél nagyobb preferencia vektorok esetére ($n = 6, 7$)

	n=6				n=7			
m	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM
5	608	448	464	261	585	334	428	182
10	636	447	409	212	578	344	377	141
100	616	388	344	140	578	304	297	107
200	644	408	331	140	575	284	312	91

300	628	387	314	165	580	284	303	84
400	612	413	319	164	551	296	322	100
500	624	396	341	127	584	275	295	89
600	603	385	304	152	555	312	277	93
700	628	405	319	148	561	318	281	100
800	609	379	350	125	565	331	271	93
900	612	383	338	125	570	282	298	99
1000	584	425	298	146	557	314	273	93

Szimulációs adatok magas dimenziójú ($n = 8, 9$) preferencia vektorok esetére

	n=8				n=9			
m	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM	EDBAM	ADBAM	AIPWAMM	AIPWGMM
5	538	253	430	106	489	210	405	127
10	606	253	342	74	578	170	347	70
100	535	256	302	55	537	195	322	53
200	557	246	276	61	528	207	302	44
300	544	220	307	67	547	181	298	38
400	549	242	288	44	522	187	302	56
500	545	224	304	63	508	195	306	39
600	521	246	267	78	512	211	288	53
700	531	235	296	63	534	191	296	38
800	525	236	304	64	509	193	306	41
900	540	230	304	59	516	194	306	40
1000	531	246	305	49	516	204	291	43

A Fuzzy AHP pszeudo-algoritmus a több stakeholder csoport esetén entropikus, és újonnan javasolt konszenzus-teremtéssel

Pseudo representation of the proposed algorithm

Phase 1: Intuitionistic fuzzy analytical hierarchy process (IF-AHP)

Input: n : number of main or sub-criteria (i and $j = Alias = 1, 2, \dots, n$), m : number of groups ($g_l = g_1, g_2, \dots, g_m$), s_{g_l} : number of decision-makers in each group ($k = 1, 2, \dots, s_{g_l}$), $s_{g_l}^k$: k^{th} decision – maker in group g_l , p : number of pairwise comparison matrices,

Output: The weights of the criteria

begin

for $p=1:k \times m$ **do**

Step 1: Perform the consistency analysis

Step 1.a. Input linguistic intuitionistic fuzzy preferences to construct pairwise comparison matrices

$(\tilde{R}_{ijk}^{g_l} = (\tilde{r}_{ijk})_{\text{nxn}}^{g_l})$ for each decision-maker ($s_{g_l}^k$) in group (g_l) based on Table 1.

Step 1.b: Convert fuzzy linguistic terms into corresponding crisp numbers $\tilde{R}_{ijk}^{g_l} \sim R_{ijk}^{g_l} = (r_{ijk})_{\text{nxn}}^{g_l}$ based on Table 1.

Step 1.c: Aggregate the judgments of each decision-maker by using the geometric mean formula as follows:

$$R_{ij}^{g_l} = (r_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \left[\sqrt[s_{g_l}^k]{\prod_{k=1}^{s_{g_l}^k} (r_{ijk})_{\text{nxn}}^{g_l}} \right] \text{ for } i, j = 1, \dots, n \text{ and } g_l = g_1, g_2, \dots, g_m$$

Reciprocal values are determined for each pairwise comparison matrices as using the following rule:

$$(r_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \frac{1}{(r_{ji})_{\text{nxn}}^{g_l}}$$

for each pairwise comparison matrix $R_{ij}^{g_l}$ **compute** consistency ratio (CR):

$$(R_{ij}^{g_l} - \lambda_{\max} \cdot I) w_i = 0$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Based on Table 2 for \Rightarrow

where λ_{\max} is the maximum eigenvalue, w_i is the eigenvector of the matrix R^{g_l} , RI is the random consistency index, and I is the identity matrix.

end for

Step 1.d: Comment the results of classical consistency analysis

if $CR > 10\%$:

return to **Step 1.a**

else:

go **Step 2**

end if

Step 2: Return to intuitionistic fuzzy numbers to find local and global weights of the criteria.

for $g_l = 1:m$ **calculate weights**

Step 2.a: Convert the linguistic terms to their corresponding intuitionistic fuzzy numbers (IFNs).

Aggregate the intuitionistic fuzzy numbers to construct intuitionistic fuzzy pairwise comparison matrices for each decision-maker in each group.

Step 2.b: Aggregate the IFNs by using Intuitionistic Fuzzy Weighted Geometric Operator:

$$(\tilde{r}_{ij})_{\text{nxn}}^{g_l} = \langle [\mu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l}, \nu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l}] \rangle = \left\langle \left[\prod_{k=1}^{s_{g_l}} (\mu_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right], \left[1 - \prod_{k=1}^{s_{g_l}} (1 - \nu_{\tilde{r}_{ijk}}^{g_l})^{w_{g_l}^k} \right] \right\rangle$$

where the weight of decision-maker is $w_{g_l}^k = \frac{1}{s_{g_l}}$ and $\sum_{k=1}^{s_{g_l}} w_{g_l}^k = 1$ for $\forall g_l$.

Step 2.c: Reciprocal values are determined based on the following equation:

$$(\tilde{r}_{ji})_{\text{nxn}}^{g_l} = \langle [\nu_{\tilde{r}_{ji}}^{g_l}, \mu_{\tilde{r}_{ji}}^{g_l}] \rangle$$

Step 2.d: To obtain local weights of each criterion in terms of each group, the weighted sum is calculated by using Intuitionistic Fuzzy Weighted Arithmetic Operator as follows:

$$(\tilde{r}_i)^{g_l} = \langle [\mu_{\tilde{r}_i}^{g_l}, \nu_{\tilde{r}_i}^{g_l}] \rangle = \left\langle \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right], \left[\prod_{j=1}^n (\nu_{\tilde{r}_{ij}}^{g_l})^{w_j} \right] \right\rangle$$

where the $w_j = \frac{1}{n}$ and $(j = 1, 2, \dots, n)$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Step 2.e: Defuzzify the $(\tilde{r}_i)^{g_l}$ fuzzy numbers to get crisp weights based on score function as follows

$$r_i^{g_l} = \text{Score}(\tilde{r}_i^{g_l}) = \frac{2\mu_{\tilde{r}_i}^{g_l} - \nu_{\tilde{r}_i}^{g_l}}{2}$$

Step 2.f: Normalize the $r_i^{g_l}$ values to obtain the criteria and sub-criteria weights for each group

$$\bar{r}_i^{g_l} = \frac{r_i^{g_l}}{\sum_{i=1}^n r_i^{g_l}} \text{ for } \forall g_l, g_l = g_1, g_2, \dots, g_m$$

Step 2.g: Compute the final weights by multiplying criteria and sub-criteria normalized weights

$$w_i^{g_l} = \bar{r}_i^{g_l} (i \in \text{Level } 2) \times \bar{r}_i^{g_l} (i \in \text{Level } 3)$$

where $w_i^{g_l}$ is the weight of the criterion in terms of a decision-maker group

end for

end for

Phase 2: Compute the compromise solution to find the most important criteria **Input:** n : number of criteria ($i = 1, 2, \dots, n$), s_{g_l} : number of decision – makers in each g_l group **Output:** The compromise ranking of the criteria

Method 1: The entropy-based aggregation methodology

Step 3: Compute the compromise solution

Step 3.a: Find the weighted average for each criterion as follows:

$$w_i^{ave.} = \frac{\sum_{g_l=1}^m w_i^{g_l} \times s_{g_l}}{\sum_{g_l=1}^m s_{g_l}}$$

for $g_l=1:m$ **do:**

Step 3.b: Compute the entropy measures (E_{g_l}) for each group:

$$\text{Entropy} = E_{g_l} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{1}{\ln(2)} (w_i^{g_l} \times \ln(w_i^{g_l}) + w_i^{ave.} \times \ln(w_i^{ave.})) \right)$$

Step 3.c: Calculate the diversification value (div_{g_l}) for each group:

$$div_{g_l} = n - E_{g_l}$$

end for

Step 3.d: Normalize the div_{g_l} values to find the significance level of each decision-maker group.

$$\bar{w}_{g_l} = \frac{div_{g_l}}{\sum_{g_l=1}^m div_{g_l}}$$

Step 3.e: Calculate the final compromise score of each criterion and rank them in descending order.

for $i=1:n$ **do:**

$$\sum_{g_l=1}^m \bar{w}_{g_l} \times w_i^{g_l}$$

end for

Method 2: The distance-based aggregation methodology

Step 3: Compute the compromise solution

Step 3.a: Solve the following mathematical problem to obtain the significance levels of each decision-maker group.

$$\min \sum_{g_l=1}^m \sum_{\substack{g_j=1 \\ g_l \neq g_j}}^m \frac{\|\alpha_{g_l} w_i^{g_l} - \alpha_{g_j} w_i^{g_j}\|}{2}$$

s.t:

$$\sum_{g_l=1}^m w_i^{g_l} = 1$$

$$\sum_{g_l=1}^m \alpha_{g_l} = 1$$

$$\sum_{g_j=1}^m \alpha_{g_j} = 1$$

$$w_i^{g_l} > 0, \alpha_{g_l} \geq 0, \text{ and } \alpha_{g_j} \geq 0$$

Step 3.b: Calculate the final compromise score of each criterion and rank them in descending order.

for $i=1:n$ **do:**

$$\bar{w}_{g_l} = \sum_{g_l=1}^m \alpha_{g_l} w_i^{g_l}$$

end for

end
