Válasz Bakó András bírálatára

Köszönöm Bakó Andrásnak a Közlekedéstudomány Doktorának rendkívül alapos opponensi munkáját, az értekezés téziseinek további fejlesztését szolgáló észrevételeit, megjegyzéseit és nem utolsó sorban, a doktori műről kinyilvánított pozitív értékelését. Alábbiakban megismétlem az általa feltett kérdéseket és megjegyzéseket, majd azokra megadom a válaszaimat.

1. kérdés: *Ha elfogadjuk azt a tényt, mely szerint a közlekedéspolitikai koncepciók nagyszámú alkotó eleme igen sokrétű, szerteágazó és sokirányú kölcsönhatásban áll egymással, akkor a szerző által javasolt rekurzív dinamikus programozásra épülő modell hogyan tudja kezelni a problémát?*

Válasz:

Az értekezés első fejezetében – egy doktori mű keretén belül elvárható mélységben – javaslatot tettem egy „fenntartható közlekedéspolitikai keretrendszerre", amely négy kiemelt prioritású cél szekvenciális megvalósításán alapulna. A konkrét közlekedéspolitikai célkitűzések tartalmi definiálását követően röviden tárgyaltam előnyeiket, hátrányaikat, a szükséges módszereket és eszközöket, valamint adekvát tervezési és ellenőrzési indikátorokat is javasoltam. A koncepció realizálását csak egy *optimális* közlekedéspolitikai intézkedéssorozat révén látom biztosítottnak.

Bakó András egy igen releváns kérdéskört vetett fel, ami valóban nem kellő részletességgel, illetve egyáltalán nem jelenik meg az értekezésben. Való igaz, egyáltalán nem hangsúlyoztam, hogy a koncepció szerves részeként megjelenített rekurzív dinamikus programozási modell jelenlegi formájában legfeljebb csak elvi illusztrációnak tekintendő, mivel az ebben a formában a tárgyalt probléma egy radikális leegyszerűsítési lehetőségét sugallja, ami félrevezető.

Nyilvánvalóan egy ilyen modellnek kellő részletességgel kell tartalmaznia, és láttatnia is kell a megvalósítási folyamat (időbeli) lefolyását reprezentáló irányított hálózatot, a tevékenység-sorozat meghatározóan fontos elemeit, ábrázolva azok kapcsolatait és kölcsönhatásait, feltüntetve a lényeges exogén és endogén változókat, stb. Nem szolgál ugyan mentségemre, de ehelyütt szeretném megjegyezni, hogy már egy jó ideje dolgozom egy többfokozatú, véges, determinisztikus döntési folyamat típusú dinamikus programozási modell kifejlesztésén. Ebben már törekedtem a keretrendszer főbb elemeit valósághűen leképezni, ami azt jelenti, hogy mindenegyes fokozat egy partikuláris, speciális rendszert testesít meg. Ily módon, most már nemcsak soros (lineáris) kapcsolású, hanem párhuzamos részrendszereket is tartalmaz, vagyis elágazásokat és egyesítéseket, továbbá – ami az eredeti modell talán legnagyobb hiányossága kiküszöbölésének tekinthető – negatív visszacsatolások beépítésének a lehetőségét is. Minden fokozathoz tartozik egy bemenő (állapot) és egy kimenő (döntési) paraméterhalmaz. Ez a modell már lehetővé teszi nagyléptékű numerikus elemzések végrehajtását is egy homogén, a disszertációban részletesen tárgyalt, intervallum skálán értelmezett standardizált jellemző (utilitás=hasznosság alapú értékfüggvény) bevezetésével, amelyet a közlekedési rendszerek sokféle, különböző mértékegységben megadott jellemzőjéből egy célszerű transzformációval lehet származtatni. Ezzel lehetővé válik egy megengedett vektor, azaz egy *optimális döntéssorozat* (optimális közlekedéspolitika) meghatározása, amikoris az *N*-fokozatú rendszer a Bellman-elvnek megfelelően, optimális állapotokon keresztül az

$$f_N^*(S_n) = \underset{d_1, d_2, \ldots, d_N}{\text{optimize}} \left\{ r_1(d_1, S_1) \otimes r_2(d_2, S_2) \otimes \quad \ldots \quad \otimes r_N(d_N, S_N) \right\}$$

általános célfüggvény a maximális értékét (max hasznosság) veszi fel. Reményeim szerint ez a formális operációkutatási modell hasznos lehet a javasolt négyfokozatú közlekedéspolitikai keretrendszerrel kapcsolatos döntéshozatal hatásos és hatékony támogatásárára.

2.kérdés: *Amennyiben egy konkrét gyakorlati feladat megoldása során a döntési alternatívák pontszámait és ezzel egyben a rangsorukat is reprezentáló stacionárius vektorok többszörös gyökök, akkor a döntéshozó melyik megoldást válassza ki és milyen megfontolások alapján?*

Válasz:

A matematikában jól ismert a legkisebb négyzetek módszerével megoldható nemlineáris optimalizálási problémák nemkonvex természete. Ennek egyik nemkívánatos következménye többszörös megoldások esetenkénti előfordulása. Ez alól nem mentes a páros összehasonlítási mátrixok Frobenius norma minimalizási feladata sem. Elégséges feltételek megfogalmazása (lásd [1]), továbbá nagyszámú numerikus vizsgálatom kapott eredményei szerint (lásd [2]), ennek előfordulási gyakorisága szerencsére elenyészően csekély a gyakorlatban (becslésem szerint 10^{-4}–10^{-5} nagyságrendű). Ilyen esetek bekövetkezése során a többszörös megoldást reprezentáló $\mathbf{w}^*$ stacionárius vektorok száma 2 és 15 között váltakozott. Természetesen nem zárható ki az sem, hogy 15-nél több vektor képezi a nem egyértelmű megoldások halmazát.

A feltett kérdés megválaszolásához statisztikai közelítésmód alkalmazását javasolom, amit azzal lehet indokolni, hogy ilyen esetekben a $\mathbf{w}^*$ súlyvektorok elemei *valószínűségi változónak* tekinthetők. Továbbá, minden ilyen többszörös megoldásra vezető optimalizálási feladatra vonatkozóan helyénvaló módon feltételezhetjük, hogy a többszörös gyökök halmazán belül az egyes stacionárius vektorok bekövetkezése *azonos* valószínűségű, tehát azok és így elemeik is *egyenletes eloszlású* valószínűségi változók. Mármost csak az a kérdés, hogy hogyan, azaz milyen becslő függvénnyel adjunk becslést az ’eredő’ (helyettesítő) stacionárius vektor elemeire. A ”legjobb” becslés nyilvánvalóan az lesz, amelyik a Ronald Fischer-féle becslési követelményeket maradéktalanul kielégíti és a lehetséges variációk között a legjobb.

Az értekezésben $\mathbf{w}=(w_i)$, $w_i>0$, $i=1,2,\ldots,n$, jelöli a meghatározandó súlyvektort. Egy többszörös megoldás stacionárius vektorainak (többszörös lokális minimum) jelölésére vezessük be a $\mathbf{w}^{*(l)}$ jelölést, ahol N a többszörös megoldás kardinalitása, vagyis az azonos célfüggvény értékkel bíró súlyvektorok száma. A vektorok elemeit, mint valószínűségi változókat jelölje $\xi_i^{(l)}$. A továbbiakban egyszerűsítési okokból elhagyjuk az i alsó- és az l felső indexeket. Az alábbi egyszerű számításokat értelemszerűen a $\mathbf{w}^{*(l)}$ minden i sorára szükséges elvégezni, figyelembe véve az l adott értékét.

A ”legjobb”, azaz a meghatározandó ’eredő’ stacionárius vektor becslő függvényének konstruálásához a következő megfontolások alapján juthatunk el:

Az egyenletes eloszlás paraméterei közül a *várható érték* becslésére a két szélső mintaelem számtani közepe, vagyis a

$$\frac{\xi_1^{'}+\xi_M^{'}}{2}$$

kifejezés, egyrészt *torzítatlan* becslése az

$$M(\xi)=\frac{w_{\min}^*+w_{\max}^*}{2}$$

várható értéknek, másrészt *szórásnégyzete* $1/n^2$ nagyságrendű:

$$D^2=\left(\frac{\xi_1^{'}+\xi_M^{'}}{2}\right)=\frac{(w_{\max}^*-w_{\min}^*)^2}{2(n+1)(n+2)},$$

ezzel szemben a számtani közép (aritmetikai átlag) szórásnégyzete $1/n$ nagyságrendű:

$$D^2(\xi) = \frac{D^2(\xi)}{n} = \frac{(w^*_{\max} - w^*_{\min})^2}{12n}.$$

Tehát egyenletes eloszlás esetén az összes mintaelem számtani közepének (aritmetikai átlagának) szórásnégyzete egy nagyságrenddel ”rosszabb”, mint a legnagyobb és a legkisebb mintaelem számtani közepének szórásnégyzete. Következésképpen, az ilyen rendezett mintás becslés jobb hatásfokú. Ennek következtében joggal kimondhatjuk, hogy az utóbbit *efficiens* becslésnek tekintjük.

Mivel a második momentum (szórásnégyzet) létezik, a ξ *erősen konzisztens* becslés az $M(\xi)$ várható értékre.

Továbbá az is könnyen megmutatható, hogy a $(\xi_1' + \xi_M',\ \xi_M' - \xi_1')$ statisztikapár *elégséges* becslés

a $\left(\frac{w^*_{\min} + w^*_{\max}}{2},\ w^*_{\max} - w^*_{\min} \right)$ paraméterpárra.

3. kérdés: *A hiányos adatokkal bíró PCM esetében is lehetséges-e végső prioritási súlyok meghatározása a sajátvektor módszer segítségével, vagy más ismert súlymeghatározó eljárással, és ha igen, akkor milyen módon, továbbá egyértelmű-e az így nyert megoldás?*

Válasz:

Vezessük be egy hiányos elemeket tartalmazó, un. *nem teljesen kitöltött* páros összehasonlítási mátrixra az $\mathbf{A}(\mathbf{x})=\mathbf{A}(x_1,x_2,x_3,\dots,x_p)$ jelölést, ahol az $x_1,x_2,x_3,\dots, x_p$ változók a hiányzó elemeket jelölik a felső háromszög mátrixban. Értelemszerűen a hiányzó elemek száma $2p$. Shiraishi et al. [3] azt javasolták, hogy a mátrix optimális kitöltését úgy határozzuk meg, hogy legyen inkonzisztenciájának mértéke minimális. Vegyük észre, hogy ez a feladat ekvivalens a mátrix legnagyobb abszolút értékű sajátértékének a minimalizálásával, hiszen inkonzisztenciájának szintje jó közelítéssel proporcionálisan változik a $\lambda_{\max}$-szal. Most már felírhatjuk tehát ezt a minimalizálási feladatot a mátrix Perron-tétele szerint biztosan pozitív principális sajátértékére:

$$\min_{\mathbf{x}\in\mathfrak{R}^+} \lambda_{\max}\big(\mathbf{A}(\mathbf{x})\big).$$

Tehát egy olyan optimális $\mathbf{x}$ vektort keresünk, amely minimalizálja a $\lambda_{\max}$-ot. Ezt megtehetjük, mert Harker [4] bebizonyította, hogy egy $\mathbf{A}$ páros összehasonlítási mátrix Perron sajátértékének léteznek az $\mathbf{A}$ elemei szerinti összes parciális deriváltjai, amelyek közül explicit formában is megadta az első és a másodrendű parciális deriváltakat.

A $\lambda_{\max}$ minimum létezésének igazolásához Bozóki et al. [5] megmutatták, hogy ezt a feladatot parametrizálással egy *konvex* optimalizálási feladattá lehet transzformálni, úgy hogy az $x_i=e^{y_i}$, $i=1,2,\dots,p$, helyettesítés bevezetésével megkonstruálhatunk egy $\mathbf{C}$ mátrixot. Tehát

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}(\mathbf{y}) = \mathbf{C}(y_1, y_2, \dots, y_p) = \mathbf{A}(e^{y_1}, e^{y_2}, \dots, e^{y_p}).$$

A parametrizált $\mathbf{C}(\mathbf{y})$ nem teljesen kitöltött mátrixra a $\lambda_{max}(\mathbf{C}(\mathbf{y}))$ az y-nak logkonvex, és ebből következően konvex függvénye. Meg lehet mutatni azt is, hogy *szigorúan konvex* függvénye. Ily módon az eredeti feladatot egy szigorúan konvex optimalizálási feladattá lehet átalakítani.

A $\lambda_{max}(\mathbf{A}(\mathbf{x}))$ minimalizálási feladatnak pontosan akkor *egyértelmű* a megoldása, ha az **A** nem teljesen kitöltött páros összehasonlítási mátrixhoz tartozó G irányítatlan gráf *összefüggő gráf*. Felhasználva a Perron sajátérték parciális deriváltjait, a sajátérték optimalizálásának feladatát az [5] cikkben szereplő algoritmus segítségével lehet végrehajtani, ami egy speciális, az *fminbnd* kóddal azonosítható Matlab függvénnyel történhet. Alternatív eljárásként az optimális **x** vektor meghatározása egyváltozós, vagy többváltozós Newton iterációval is történhet. A súlyvektor meghatározása a teljesen kitöltött páros összehasonlítási mátrixoknál alkalmazott módszerekkel történhet. Így például a *sajátvektor* módszerrel vagy a *logaritmikus legkisebb négyzetek* módszerével. Mindkét optimalizálási feladatnak pontosan akkor van *egyértelmű* megoldása, ha az összehasonlított elemek gráfja *összefüggő*. Megjegyezzük, hogy ez a feltétel nem mindig áll fenn a *legkisebb négyzetek* módszerének az alkalmazásakor.

4. kérdés: *Mik a feltételei a további esetek, azaz a "Cases (ii), (iii), (iv)" bekövetkezésének és milyen tulajdonságok jellemzik ezeket az eseteket?*

Válasz:

A Doktori Szabályzatban a doktori értekezésekre előírt terjedelmi korlát miatt nem volt módom ezeknek az eseteknek a tárgyalására. Itt jegyzem meg, hogy részletes matematikai elemzésük megtalálható a [6] folyóiratcikkben. Az alábbiakban csak az általam legérdekesebbnek tartott néhány tulajdonságukat fogom kiemelni.

Igen sok különböző méretű és inkonzisztenciájú páros összehasonlítási mátrix-szal elvégzett számítógépes futtatásaim numerikus tapasztalatai azt mutatták, hogy ha egy **A** mátrix inkonzisztenciájának a mértéke egy bizonyos fokú perturbációs szintet meghalad, akkor a „triple R-I"-nek elnevezett rekurzív iteráció a $k=q$ lépésben és a közvetlenül követő lépésekben olyan (ii) $\mathbf{H}_q^{(ii)}$ és $\mathbf{H}_{q+1}^{(ii)}$, (iii) $\mathbf{H}_q^{(iii)}$, $\mathbf{H}_{q+1}^{(iii)}$ és $\mathbf{H}_{q+2}^{(iii)}$, és (iv) $\mathbf{H}_q^{(iv)}$, $\mathbf{H}_{q+1}^{(iv)}$, $\mathbf{H}_{q+2}^{(iv)}$ és $\mathbf{H}_{q+3}^{(iv)}$ megszilárdult határmátrixokhoz tart, amelyek ellentétben az (i) esettel már *nem vonalösszeg szimmetrikusak* és ezért *nem kiegyenlítettek*. Ezt a tényt bebizonyítottam. Azonban ezek az esetek egy további igen érdekes tulajdonsággal is bírnak, Ugyanis tovább folytatva az iterációt, rendre, l=2, l=3 és l=4 hosszúságú ciklusokkal, egy végtelen, önmagukat mindig *megismétlő* folyamatot produkálnak. Bebizonyítottam [6], hogy az e mátrixokat generáló súlyvektorokból álló diagonál mátrixok szorzatának határértéke is egy n-edrendű egységmátrix (ugyanúgy, mint az (i) esetben):

$$\text{(ii)}\ \lim_{k\to\infty}\{\mathbf{W}_k\mathbf{W}_{k+1}\}=\mathbf{I}_n,\ \text{(iii)}\ \lim_{k\to\infty}\{\mathbf{W}_k\mathbf{W}_{k+1}\mathbf{W}_{k+2}\}=\mathbf{I}_n,\ \text{és}\ \ \text{(iv)}\ \lim_{k\to\infty}\{\mathbf{W}_k\mathbf{W}_{k+1}\mathbf{W}_{k+2}\mathbf{W}_{k+3}\}=\mathbf{I}_n,$$

ahol k=0,1,2,… . A számítógépes futtatást megelőzően a felhasználó egy tetszőlegesen kicsiny $\varepsilon>0$ pontosságot állíthat be.

Ha tranzitív páros összehasonlítási mátrixok egy adott a_{ij} elempárjánál egy folytonos δ (és értelemszerűen $1/\delta$) multiplikatív perturbációt vezetünk be és a többi elemét rögzítjük, akkor az inkonzisztencia függvényében való viselkedésük sajátosságai egzakt módon megismerhetők. Ilyen vizsgálati mód alkalmazásával lehetővé vált e mátrixok tartományokba (kategóriákba) történő besorolása is, és ezáltal (i) *közel konzisztens*, (ii) *gyengén inkonzisztens*, (iii) *közepesen inkonzisztens* és (iv) *erősen inkonzisztens* páros összehasonlítási mátrixok megkülönböztetése. Fontos megjegyezni – ami valamennyi esetre igaz – hogy a magukba foglalt, az iteráció folytatásával periódikusan ismétlődő $\mathbf{w}^{(l)}$, l=1,2,3,4 súlyvektorok közül mindegyik esetben csak a $\mathbf{w}^{*(q)}$ reprezentál stacionárius gyököt (lokális minimumot). Mivel ezek egyszeres megoldások, ezért ez a $\mathbf{w}^{*(q)}$ a többi $\mathbf{w}^{(k)}$, k=q+1,q+2,q+3, súlyvektorral nem képez többszörös megoldásokat. Ezt a megállapításomat homotópiás módszerrel igazoltam, amelynek alapelve, hogy ha az eredeti függvényt egy η változótól lineárisan függő másik függvénybe transzformáljuk át, akkor a nemlineáris mátrix egyenletek valamennyi gyöke (zérushelye) kiszámítható, amely listából a minimális célfüggvényértékhez tartozó pozitív elemű vektort azonosíthatjuk.

Fontos eredményemnek tartom azt is, amellyel megmutattam az ’eredő’ (helyettesítő), $\mathbf{w}_g^{(l)}$-vel jelölt súlyvektor, valamint az ’eredő’ $\mathbf{H}_g^{(l)}$ reziduális határmátrix meghatározásának módját. Bebizonyítottam [6], hogy mind a $\mathbf{w}_g^{(l)}$, mind pedig a $\mathbf{H}_g^{(l)}$, az ismétlődő ciklusok hossza által meghatározott számú súlyvektor-, illetve határmátrix sorozatok azonos indexű elemeinek Hadamard szorzatából képzett *geometriai átlaga*. Ez a $\mathbf{H}_g^{(l)}$-re formálisan felírva:

$$\mathbf{H}_g^{(l)} = \left(\prod_{r=1}^{N} \circ \mathbf{H}_{q+(r-1)}^{(l)} \right)^{1/N},$$

ahol l=i, r=1, N=1; l=ii, r=1,2, N=2; l=iii, r=1,2,3, N=3; l=iv, r=1,2,3,4, N=4.

5. kérdés: *A jelölt megítélése szerint melyek lesznek azok a műszaki, környezeti és gazdasági jellemzők, amelyekben a hidrogéncellás városi autóbuszok felülmúlják majd a többi alternatív hajtásrendszerű és a hagyományos diesel autóbuszok hasonló paramétereit az általa előrevetített trend 2030-as időpontja körül? Becsléseit milyen információkra alapozza?*

Válasz:

A KSIM számítógépes szimulációval végrehajtott, az elkövetkező mintegy 15 évre (2030-ra) vonatkozó előrejelzésemet, célzott szakirodalom kutatás alapján (egyebek között [7]), valamint szakértőkkel folytatott konzultációkból származó információk és adatok alapján végeztem el.

Az autóbuszokban alapvetően kétféleképpen lehet hidrogént hajtásra felhasználni: *tüzelőanyag-cellákban* (pl. a Mercedes Citaro 0530-as modellje), vagy *belsőégésű motorokban* (pl. a MAN Lion’s City modellje). A tüzelőanyag-cellák (fuel-cell) hidrogén és oxigén egyesítésével elektromos áramot állítanak elő és ezzel az elektromos energiával villanymotorokat lehet meghajtani. A belsőégésű motorokban a hidrogént elégetik, a jármű meghajtása pedig a hagyományos benzin és gázolaj üzemanyagokat felhasználó motorokhoz hasonlóan történik. A ma leginkább elterjedt tüzelőanyag-cella a protonáteresztő elektrolit membrános cella, ahol az oxigén redukálására két elektródát használnak. Egy cella azonban csak kb. 1,25 V feszültséget tud szolgáltatni, továbbá a működéséhez gázok beáramoltatása szükséges, ezért ilyen rendszer alkalmazása esetén un. cella kötegeket kell létrehozni. Ezek üzemi hőmérséklete 80-85 ˚C, a kipufogó gázokkal kiáramló hőmennyiség viszont csekély, ezért nagyméretű hűtőradiátorokat igényel az üzemanyag-cellás rendszer.

A *károsanyag kibocsátás* (emisszió) egészségre ártalmas környezeti jellemzői a tüzelőanyag-cellás konstrukciónál gyakorlatilag zérus értékűek (csak vízgőz távozik a levegőbe). A hidrogén belsőégésű motoroknál CO_2 kibocsátás nincs, a NO_x kibocsátás 0,2 g/kWh (egy nehéz üzemű dízelmotoré ~ 2 g/kWh), a HC (hidrokarbon) kibocsátás 0,04 g/kWh (~ 0,46 g/kWh) a PM szilárd halmazállapotú részecske kibocsátás pedig < 0,005 g/kWh (~ 0,02 g/kWh). Tehát a hidrogén üzemű autóbuszok emissziója minden komponensnél több mint egy nagyságrenddel kisebb mint a dízelmotoros hajtású autóbuszoknál.

A *környezeti zajterhelést* illetően, amíg a tüzelőanyag-cellás autóbuszok közlekedése majdnem zajtalan (< 10 dB) a belsőégésű motoros hidrogénüzemű járműveké pedig 40 dB körüli, addig a konvencionális diesel hajtású buszoké meghaladja a 60-70 dB-t is.

Energiahatékonyság szempontjából vizsgálva a kérdést a tüzelőanyag-cellás városi buszok a domborzati viszonyokról függően 20-28 kg/100 km hidrogént igényelnek, ami 66-93 liter/100 km gázolaj fogyasztásnak felel meg. Ez a hagyományos és hasonló méretű diesel buszok 28-40 liter/100 km gázolaj fogyasztásával szemben nagyon magas érték. Az ilyen magas fogyasztás a hidrogénüzemű autóbuszoknál egyrészt a villamos energia tárolás hiányának, másrészt a hajtáslánc kialakításának (pl. a Mercedes Citaro 0530-as modellnél a villanymotor egy hat-fokozatú hidromechanikus nyomatékváltón keresztül hajtja a hátsó tengelyt) tudható be. Azonban jelentős javulás érhető el, ha a villamos motor közvetlenül hajtja a kerekeket, olyannyira, hogy ma már van olyan konstrukció is, ahol a motort a kerékagyban helyezik el. Ilyen esetben az autóbusz már képes fékezés során visszatáplálni is nagyméretű lítium akkumulátorokba. Az üzemanyag fogyasztást jelentősen lehet csökkenteni akár 10-14 kg/100 km értékre, un. soros hibrid rendszer kialakításával (ekkor a belsőégésű motor és a generátor szerepét átveszi az üzemanyag-cella). Figyelemre méltó fejlesztési újdonság az un. tripla hibrid busz, amelynél a villamos hajtómotorok három forrásból is kaphatják az energiát, így az üzemanyag-cellákból, akkumulátorokból és ultrakapacitásokból. Ez a megoldás biztosítja az üzemanyag-cella folyamatos és hirtelen változásoktól mentes üzemét, az ultrakapacitások pedig az akkumulátorokat kímélik meg a gyorsan bekövetkező nagy teljesítményugrásoktól (Trihybus). Ilyen konstrukciós kivitelezésnek köszönhetően a busz igen keveset, 8,5-12 kg/100 km (28,3-39,8 liter/100 km gázolaj egyenérték) fogyaszt városi üzemmódban.

A hidrogénüzemű autóbuszoknál általában jelentős probléma a hidrogén *tárolása*. Nagyméretű és nagy tömegű kompozit tartályokra van szükség, amelyeket a busz héjszerkezetének tetejére helyeznek el, amely mögött még itt kap helyet az üzemanyagcella egysége is a kiszolgáló berendezésekkel, sőt a nagyméretű hűtők is a busz közepe tájékán.

Intenzív műszaki fejlesztések eredményeképpen mostanra a vezető gyártók elérték az egyszeri feltöltéssel teljesíthető 480 km körüli *hatótávot* és a 3-5 perces *tankolási időt*. Hangsúlyos fejlesztési irányzat figyelhető meg a nagyobb kapacitású (utas befogadóképességű) buszok előállítására. Így például, a Van Hool A 331-es típusa már 104 utast tud szállítani, amelynél a jelentős *súlytöbbletet* a busz megnyújtásával és harmadik tengely beépítésével kezelték. Így az utasszállítási kapacitás ekkor már jóval nagyobb lesz, mint a kéttengelyes hidrogénes buszok (65-80 fős) kapacitása. Megjegyzem, hogy már léteznek tripla hibrid rendszerű háromtengelyű csuklós hidrogén buszok is (Phileas).

A hidrogén üzemű buszok jelenleg még legnagyobb hátránya más hajtásrendszerű buszokkal szemben a rendkívül magas *beszerzési ár* (egyetlen busz mintegy 1,25 millió EUR). Ezért az általam végrehajtott előrejelzés során 2030-ra már a hidrogénüzemű buszok *sorozatgyártását* feltételeztem, valamint, hasonlóképpen, az előállításukhoz, a tankoláshoz és a szervizelésükhöz szükséges *infrastruktúra* hálózat megfelelő kiépítését és rendelkezésre állását.

Hivatkozások

[1] Farkas, A., Lancaster, P. és Rózsa,P.: “Approximation of positive matrices by transitive matrices”. *Computers and Mathematics with Applications*. **49.** (2005), 1033-1039.

[2] Farkas, A. és Rózsa, P.: “On the non-uniqueness of the solution to the least-squares optimization of pairwise comparison matrices”. *Acta Polytechnica Hungarica*. **1.** (2004), 1-22.

[3] Shiraishi, S., Obata, T. és Daigo, M.: “Properties of a positive reciprocal matrix and their applications to AHP”. *Journal of the Operations Research Society of Japan*. **41.** 3, (1998), 404-414.

[4] Harker, P. T.: “Derivatives of the Perron-root of a positive reciprocal matrix: with applications to the Analytic Hierarchy Process”. *Applied Mathematics and Computation*. **22.** (1987), 217-232.

[5] Bozóki, S., Fülöp, J. és Rónyai, L.: “On optimal completions of incomplete pairwise comparison matrices”. *Mathematical and Computer Modelling*. **52.** (2010), 318-333.

[6] Farkas, A. és Rózsa, P.: ”A recursive least-squares algorithm for pairwise comparison matrices”. *Central European Journal of Operations Research*. **21.** (2013), 817-843.

[7] Hydrogen Fuel Cell Bus Evaluations. Hydrogen and Fuel Cell Research. National Renewable Energy Laboratory. The Fuel Cell Technologies Office, Washington DC, USA, 2014

Tisztelettel:

Farkas András

Budapest, 2015. augusztus 22.