BUDAPEST MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI KAR

KANDÓ KÁLMÁN MULTIDISZCIPLINÁRIS MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Tézisfüzet

Az Európai Kisrepülőgépek Elérhetőségének Nemlineáris Előrejelző Modellje 2020-ra

Írta

ROHÁCS Dániel

Témavezető: Dr. Gausz Tamás (PhD)

Budapest, 2007

1. Bevezető

Az 1966 és 2006 közötti mobilitás vizsgálatok bizonyítják, hogy minden százalék GDP (összes hazai termék) növekedés a polgári légiforgalomban 1 - 2 %-os növekedést eredményez [1, 2]. 2006-ban, a többi közlekedési ágazathoz képest, a további GDP növekedés 2020-ra megduplázhatja a légi közlekedés forgalmát [3, 4]. A légiközlekedés már napjainkban számos területen közelit kapacitásának határaihoz, így az csak korlátozottan tudna alkalmazkodni az előrejelzett forgalom nagyságához. Erre a problémára, a lehetséges megoldások között szerepel a kapacitás kiegyensúlyozás, amely a forgalom további fejlődését egy új európai kisrepülőgép bevezetésével (EK) biztosítaná [R6, R10], kiaknázva az alulhasznált lehetőségeket, mint a regionális vagy kis repülőtereket. Tudván, hogy (i) az egyes közlekedési ágazatok, és különösen a gyorsvasúthálózat csak magas népsűrűségű városok között üzemel [5, R4], valamint hogy (ii) az Európai Unióhoz újonnan csatlakozott országok közlekedési infrastruktúrái hiányosak [R4, 6], az EK bevezetése az utasszám növekedésének megoldására szintén ésszerű.

Meghatározásom alapján, az EK egy olyan kisrepülőgép, amely maximálisan 6 - 8 utast szállít, és amely az előzetes forgalmi adatok hiánya miatt, mind a szimpla és két dugattyús, gázturbinás légcsavaros, illetve sugárhajtással biztosított. 2006-ban, körülbelül 60 000 [7, R9, R11] ilyen EK létezik Európában, melyeket 300 000 [7, R7, R11] magán pilóta használ. Ezen túl, hasonlóan a Small Aircraft Transportation System (SATS) [8], a Personal Air Transportation System (PATS) [2, 6], a UK JETPOD [9] és egyéb, a tárgyhoz tartozó koncepcióhoz hasonlóan, a rendelkezésre álló technológiák ”személyes” szállításon alapuló [R10] közlekedéssé tehetik az EK forgalmát, amely igényorientált, point-to-point, flexibilis közlekedésként maximálisan kielégíthetné a piaci igényeket [R10]. Felhasználva a fejlett pilótafülke műszerezettséget [R6, 10, 11], alkalmazva a mesterséges látványt előállító technológiákat [10], új üzemeltetési eljárásokat (highway-in-the-sky) [12, 13, 14], automatikus fel / leszállást segítő rendszert [2, 5, 6] és egyéb elképzeléseket [R6, 15, 16], az európai kisrepülőgép elérhetővé válhat akár az átlagember számára is, miközben a repülőgép vezetése csak korlátozott gyakorlatot igényelne, hasonlóan a személyautók vezetési nehézségéhez [R10, 2, 5, 6]. Mivel a fentiekben említett repülőgépcsoport elérhetősége megváltozhat, az EK fejlődése további vizsgálatokat kíván, hogy példaként megválaszolhassuk mi annak a légi irányítás (Air Traffic Control) paramétereire gyakorolt hatása. Tudván, hogy csak korlátozott számú vizsgálatok terjednek ki az EK illetve a hasonló kisrepülőgépekre, a rendelkezésre álló alapadatok nem elegendőek a fenti vizsgálat teljesítéséhez. Így a Doktori Értekezés célja, hogy létrehozzon egy európai kisrepülőgép előrejelző modellt, és ezzel megteremtse az EK hátterét a további döntés előkészítés és kockázat elemzés területén.

2006-ban számos kisrepülőgép előrejelzés fellelhető a repülőgépipar különböző szereplőitől, mint az Embraer [17], az FAA [18], a Forecast International [19], a Honeywell [20], a NASA [21], a Rolls-Royce [22], valamint a Teal Group [23]. Mivel a kisrepülőgép egy újszerű légi közlekedést testesít meg és így a rendelkezésre álló alapadatok csak korlátozottan lelhetőek fel, a fentiekben említett előrejelzések eltérő feltevéseken alapulnak, valamint az alkalmazott módszerek nyilvánosan nem elérhetőek. Ezen kívül többségük az amerikai piacra és az ultra könnyű sugárhajtású kisrepülőgépekre összpontosít, amely nem képes az európai – gazdasági és egyéb – sajátosságokat kellően figyelembe venni, különösképpen, hogy más meghajtásrendszer is számításba jöhet. Így az EK előrejelzése céljából analíziseim kiterjedtek a hagyományos légi közlekedésben használt általánosan előforduló előrejelző valamint kereslet modellek vizsgálataira is. Ami az utóbbit illeti, a legtöbbet használt modellek az

alábbi négy kategóriába sorolhatóak [24, R5]: lineáris, log-lineáris, logit valamint a translog módszer. Ezek közül a lineáris gyakran használatos az irodalomban, mert a többi modellhez képest ez viszonylag könnyű becslést eredményez, és előnyös a tapasztalati eredmények értelmezésében. Ennek ellenére a modell paraméterek és az eredmény között feltételezett lineáris kapcsolat képtelen valóságszerűen reprezentálni a lehetséges nemlineáris összefüggéseket az EK fejlődésében.

A log-lineáris (vagy Cobb-Douglas [25]) modell a közlekedés nagyságának logaritmusát fejezi ki a független változók logaritmusának, mint lineáris funkciók függvényében. Az elaszticitás értékek meghatározásánál tapasztalt előnye miatt, az irodalmi áttekintés ezt a modellt találta a legtöbbet alkalmazottnak. Mindamellett, a log-lineáris modell legfőbb hátránya, hogy az elaszticitás értékek változatlanok a szimulációs időtartam alatt, amely képtelen az európai kisrepülőgép esetében tapasztalható nemlineáris keresleti fejlődés modellezésére.

A fentieken kívül a kereslet modellezésére a logit forma [26, 27] az alternatív közlekedési ágazatok piaci részesedését alkalmazza, amely a log-lineáris modellt kiterjeszti a kategórikus és közös változók felhasználásával. Ennek legfőbb előnye, hogy a két alternatív eset egy S-görbét eredményez, amely valósághűen ábrázolja a döntéshozók közlekedési ágazatok közötti váltásának viselkedését.

Végül a translog modell [24, R5] alapját egy rugalmas – a hasznosságot jellemző – (utility) függvény képezi. Míg ez a módszer széleskörűen alkalmazott a közlekedési ágazatok költségfüggvényére [24, 28, 29], az európai kisrepülőgép esetében a legfőbb hátránya a modell paraméterek meghatározásának bonyolultsága.

Ami az előrejelző modelleket illeti, elsőként a regresszió és a trend analízis került feltárásra [R5, 30]. E módszerek a korábbi valóságos adatokból kiindulva állapítanak meg egy múltbéli trendet / irányzatot, amire alapozva meghatározzák a változó jövőbeli alakulását. Mialatt a regresszió és trend analízis széleskörűen alkalmazott mind a lineáris és nemlineáris esetekre, hátránya az EK céljaira, hogy múltbéli adatokra épül, amely Európában csak korlátozottan vagy nem áll rendelkezésre. Ezen kívül a NASA szerint [5], ezek az előrejelző módszerek csak általános eredményt adhatnak, hiszen az extrapolációk alkalmazása – amikor új paraméterek is befolyásolják a piacot (például az egyszerűsített pilótafülke műszerezettség) – nem alkalmas megbízható eredmények számítására.

Az exponenciális modell a megfigyelések időbeli sorozataira épül, növekvő fontosságot tulajdonítva a későbbi megfigyelések esetére [R5, 30]. Így a regressziókhoz képest, ezt az eljárás jobban figyelembe tudja venni a legkésőbbi technológiai fejlődéseknek az EK térnyerésére, azonban, itt is hátrány a múltbéli adatok igénylése.

Más módszer az összehasonlításra épül, melyen belül a kutatás tárgya hasonló tulajdonságú tevékenységgel van összevetve [30]. Míg a módszer lehetséges alkalmazása abban rejlik, hogy az EK előrevetítése például a korai általános repülés fejlődéséből induljon ki, hátránya, hogy számításba vegye az európai kisrepülőgép lényeges előnyeit (például a teljes üzemeltetési költség csökkenését, vagy az egyszerűsített pilótafülke műszerezettség hatásait).

A felméréses módszerek [R5] az EK potenciális felhasználóival tudna foglalkozni, így számításba veheti azok elvárásait, jellegzetességeit (példaként az utazási idő illetve a teljes üzemi költség fontosságát). Ráadásul számos felmérés készülhet, akár egyenként az európai országokra, amely így visszatükrözheti az eltérő gazdasági, társadalmi és az egyéb ország specifikus jellemzőkent, példaként a gyorsvasúthálózat jelenlétét.

Végül a pont előrejelzés alternatívájaként (ahol az előrejelzés csak egy adatot eredményez minden szimulációs időre), megemlíthető az alternatív szcenáriók alkalmazása. A többi módszerhez képest ez lehetővé teszi, hogy a modell akár a bizonytalan kimenetelű független változókat is felhasználja. Míg a módszer előnyös abban, hogy akár váratlan eseményeket is figyelembe tud venni (mint egy olajkrízis), hátránya, hogy csak korlátozottan alkalmazható további kockázat elemzés és döntés elkészítés céljára, hiszen az eredmények valószínűsége nem adott.

Összességében, a fentiekben említett módszerek alkalmazhatósága az európai kisrepülőgép céljára csak korlátozott, hiszen azok alapjaiban múltbéli adatokra épülnek, és nem képesek az új paraméterek figyelembe vételére.

2. Európai kisrepülőgép légiforgalmi analízis

Mivel az európai kisrepülőgépet jellemző alapadatok csak hiányosan vagy nem lelhetőek fel, vizsgálataim kiterjedtek egy EK légiforgalmi analízisre annak érdekében, hogy az előrejelző modell kezdeti értékeit / jellemzőit megkapjam. A vizsgálat a EUROCONTROL CFMU [31] adathalmazára épül a 2004-es év alatt. Az eredmények értelmében, a napi átlagos repülésszám 1429-et eredményez. Ezek eloszlása a hagyományos légi forgalomhoz képes viszonylagosan nagy, 12000 különböző várospárt eredményezve a teljes vizsgálati időszak alatt. Különben a kisrepülőgépek 59 %-a dugattyús meghajtáson alapszik, így a legtöbb repülés rövid távon (150 km) és alacsony magasságon (FL 100) történik. Ez, a többi légtérfelhasználóval konfliktus helyzeteket eredményezhet az alacsony magasságokon előforduló viszonylagosan nagyszámú repülésekkel szemben, különlegesen a repülőterek közelében. Az EK szemszögéből nézve, a repülőterek közelsége azokat a légtereket tartalmazza, ahol a hagyományos repülések a FL 190 alacsonyabban helyezkednek el, ami eredményeim alapján egy optimális határ az EK és a hagyományos forgalom között. A légijárművek, és az indulási (SID), megközelítési eljárások (STAR) jellemzőinek ismeretében, ezek a légterek átlagosan repülőterek 130 km sugarú körében találhatóak. Mivel európai léptékben a főbb repülőterek körül ábrázolva ezek a légterek egy viszonylagosan terjedelmes földrajzi felületet adnak, a légiforgalmi analízis eredménye arra a következtetésre juttatott, hogy az EK előrejelző modell a lehetőségek szerint képes legyen figyelembe venni a kisrepülőgépes és a hagyományos légi forgalom közötti kapcsolatokat.

3. Kezdetleges előrejelző modell

Az általánosan használt módszerek alkalmazása az európai kisrepülőgép előrejelzése céljából nem ígéretes, azok számos hátránya miatt. Így, az EK tárgyához tartozó modell elkészítése érdekében egy olyan előrejelzés került kidolgozásra, amely alkalmazza a légiforgalmi analízis főbb eredményeit. Felhasználva a legtöbbet előforduló meghajtásrendszer, napi forgalommennyiség, repülési magasság és egyéb karakterisztikákról szóló adatokat, a légiforgalmi analízis megvilágította melyek lehetnek a modell főbb paraméterei [R3, R7, R9, R11]. Alkalmazva ezeket, a kidolgozott kezdetleges előrejelző modell négy fő részből áll [R3, R7]. Elsőként, a kisrepülőgép fejlődését befolyásoló piaci jellegzetességet leíró elemek [R3, R9]. Ahogyan azt az előzetes adat elemzés mutatja [R4, 32, 33], ez a GDP (bruttó hazai össztermék), a kisrepülőgép ár, a népsűrűség, és az egyéb gazdasági adatokból tevődhet össze [R4]. Ezzel szemben, hogy a modell megfeleljen az EK speciális követelményeinek, a piaci jellemzők főleg a GDP (mint a mobilitást leginkább befolyásoló tényező) és a kisrepülőgép különleges szövegösszefüggésben előforduló elemekből áll. Ezek tükrözése érdekében, a technológiai fejlődés és a reguláció lett

figyelembe véve. Az előbbi, mivel az a teljes üzemi költség csökkentése és az irányíthatóság egyszerűsítése mellett (alkalmazva például a MEMS [34], nanotechnologiát [35], új összetett fedélzeti rendszereket [10], irányítási elveket [12]), befolyásolhatja a kisrepülőgép elérhetőségét. Ami a regulációt illeti, az mind negatívan illetve pozitívan befolyásolhatja a kisrepülőgépes fejlődést (például zaj korlátozással), így a modell részét képezi. Gazdasági elméletek alapján, [32, 33] a fentiekben említett piaci tulajdonságok határozzák meg kisrepülőgépes és a hagyományos légi forgalom jellegzetességét. A modell e két részét alkotó csoportok jellemzése érdekében, két főbb elem lett figyelembe véve; a forgalom nagysága, illetve a légijármű teljes üzemi költsége, hiszen mind befolyásoló tényezőként hathat az EK fejlődésére. Ezektől eltekintve, a kisrepülőgép csoportban egy további elem, a piaci rugalmasság található [R3, R11], amely az alapadatok hiányában az EK költségének piaci rugalmasságát definiálja, a GDP illetve a technológiai fejlődéstől eltekintve. A kezdetleges előrejelző modell végső csoportja az ATM egyes elemeiből tevődik össze [R3, R11] annak érdekében, hogy vizsgálni lehessen, milyen kapcsolatban állhat a kisrepülőgép fejlődése az ATM bizonyos paramétereivel. Ennek érdekében, ez a csoport a légiforgalmi [R4, R7] illetve az ATM jövőbeli analízisének [R4] eredményeire épülve az ASM (airspace management), a fedélzeti rendszerek jellegzetessége, az elkülönítési felelősség, és az automatizálás elemekből tevődik össze. Például, az előzetes légiforgalmi vizsgálatok bebizonyították, hogy az EK forgalmának problémája a repülőterek közelében egy új, illetve átdolgozott ASM-t igényelhet, így ez az elem a modell egy része. A fedélzeti rendszerek jellegzetessége, a kisrepülőgép fedélzetén fellelhető TCAS, GPS, ADS-B és az egyéb rendszerek jelenlététől függ [15, 16]. Ebben a modellben, az elkülönítési felelősség annak fontosságával adott, eltekintve attól, hogy a jövőben az inkább a pilótáké vagy az irányítóké lesz. Hasonlóan, az automatika a jelentőségével jellemzett, amely nem veszi figyelembe, hogy az az irányítók rutinfeladatait, illetve teljes automatizált műveletet jelent fejlett rendszerek alkalmazásával, mint az Airborne Separation Assurance Systems [R4, R7].

Matematikailag, a kezdetleges előrejelző modell alapját a következő nemlineáris differenciál modell adhatja:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_x(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \tag{1}$$

ahol az **x** vektor az eredményt, az **u** vektor a bemeneti változókat, és a *t* a szimulációs időt jelöli:

$$\mathbf{x} = \left[EKszám \;\; EKpiaci_rug \;\; EKár \;\; Hszám \;\; Hár \;\; avionika \;\; ASM \;\; elkuloníté s \; automatizál ás \right]^T,$$
$$\mathbf{u} = \left[GDP \;\; regulációk \;\; techn_fejl \right]^T.$$

Mivel az (1)-es egyenlet egy nemlineáris differenciál egyenlet, annak linearizálásával, és diszkretizálásával (*T* diszkretizálási idővel ahol $t=k*T$ and $k \in N$), az előrejelző modell a következő egyenletet adja:

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k] \tag{2}$$

ahol a mátrix **A** a folyamat belső dinamikáját, míg a mátrix **B** a külső (irányítási szabályozási) befolyásolást, és k a szimulációs időt veszi figyelembe.

A különböző szcenáriók alkalmazásával és az **A** illetve **B** mátrix elemek variálásával folytatott vizsgálatok alapján bizonyítottam a kezdetleges európai kisrepülőgép előrejelző modell alkalmazhatóságát [R3, R5, R7, R11]. A kidolgozott modell legfőbb előnyei, hogy egyrészről lehetőséget ad arra, hogy előre definiáljuk az egyes modell elemek súlyát / szerepét, másrészről képes a modell belső dinamikáját elemezni (például a regulációk vagy a

technológia fejlődésének hatása a kisrepülőgép forgalomra). Ez megteremti a lehetőségét arra, hogy még eltérő légijármű karakterisztikákat is figyelembe lehessen venni, valamint, hogy megtaláljuk az ideális egyensúlyt a kezdetleges EK jellemzők, valamint a lehetséges forgalmi problémák megoldásai között. Mindazonáltal, a modell számos hátrányára fényt derült [R3, R5, R9]. Elsőként az, hogy a rendelkezésre álló alapadatok alapján csak korlátozottan azonosíthatóak a mátrix elemek. Továbbá, mivel az egyes változók között feltételezett lineáris kapcsolat nem képes kellően reprezentálni az EK fejlődésének nemlineáris tulajdonságát, végül a kidolgozott kezdetleges modell alkalmazása nem ésszerű.

4. Alkalmazott módszer

Ahogyan az előző fejezet említette, az általánosan használt előrejelző modellek egyszerű használata illetve adaptálása az EK céljából nem ígéretes számos hátránynak köszönhetően. Így a speciális modell elvárások, valamint a rendelkezésre álló bizonytalan faktorok miatt, az alkalmazott módszer egy analógiai megközelítésen alapszik: a személyautók elérhetőségének előrejelzése. Ez több szempontból is előnyös, mivel (i) statisztikailag a személyautók adatai könnyen elérhetőek, (ii) adottak a különböző európai országokra amelyek számításba veszik az eltérő gazdasági illetve más jellemző karakterisztikákat és végül (iii) az EK fejlődése hasonlóan alakulhat mint a személyautóké.

Hogy kivitelezzük a fenti célt, a lineáris illetve a log-lineáris modellek helyett, egy lehetséges módszer az S-görbékre [36] épülve adható meg. Ez realisztikusabban jellemezheti a kapcsolatot a technológia adoptálás és az idő között, mivel hosszútávon egy új technológia számos különböző jellemzőkkel leírható módon [36] piac adoptálási fázison megy keresztül (e.g. innovátorok, korai, késői felhasználók). Az irodalomban fellelhető egyéb kutatások már bebizonyították, hogy az S-görbére épülő modellek felhasználhatóak a közlekedési ágazatokban is, mivel hosszútávon ezek viselkedése hasonló az új technológiákéhoz.

Egyéb újszerű módszer az Utazási Büdzsére (UB) épül, melyet először Zahavi figyelt meg [37], mint egy rögzített arányát a jövedelemnek, melyet az emberek az utazásra fordítanak. Bebizonyosodott [37], hogy értéke minden társadalomban előrejelezhető, illetve hogy változatlan marad még kiszámíthatatlan események bekövetkezésekor is, mint egy olaj krízis. Annak ellenére, hogy a fő meghatározó eleme a GDP, az UB kiszámítható az egyes közlekedési ágazatok (mint a szemelyautó) Teljes Üzemeltetési Költségéből (TUK) is. Felhasználva ezáltal az UB jövőbeli alakulását végül meghatározható, hogy a költség-szempontból mikor válik elérhetővé egy új közlekedési rendszer, mint az EK. Mindemellett, a kisrepülőgép előrejelzése szempontjából, egy fejlettebb módszer nem egy az egész társadalmat jellemző utazási büdzsére épül, hanem több alapadatra melyet számos eltérő piaci szegmensű személyautó teljes üzemeltetési költségéből számol annak érdekében, hogy különböző társadalmi osztályokat ábrázoljon. Ez egy, a valóságot jobban szemléltető és logikusabb megközelítés, hiszen figyelembe veszi a társadalmi osztályok eltérő ár és jövedelem érzékenységét.

5. A kidolgozott előrejelző modell

A kidolgozott modell alapján egy analógiai megközelítés adja, feltételezve, hogy az EK akkor válik elérhetővé, mikor annak a teljes üzemeltetési költsége eléri a különböző szegmensű személyautók TÜK-ból meghatározott Utazási Büdzséit.

Ahogyan az 1. ábra mutatja, a modell először előrejelzi az EK valamint a személyautók teljes üzemi költségeit. Gazdasági elméletek [38], valamint a közlekedésben alkalmazott

gyakorlatok alapján [39], a TÜK a közvetlen és a közvetett költségek összegként adható meg. Az EK esetében ezt a következő egyenletet adja:

$$TUK_t^{EK} = u_{1_t} + u_{2_t} + u_{3_t} + \ldots + u_{n_t} \tag{3}$$

ahol a TUK_t^{EK} a teljes üzemi költség és az u_{n_t} a független változók a t szimulációs időnél.

Ezzel szemben, köszönhetően a több piaci szegmensnek, a személyautók teljes üzemi költsége inkább az alábbiakkal jellemezhető:

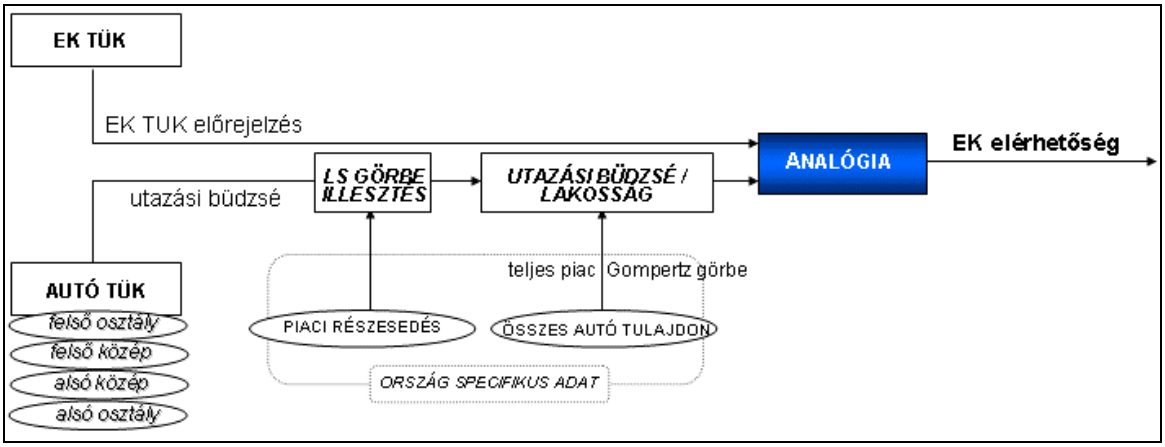
$$TUK_{i_t}^{autó} = v_{1_t}^i + v_{2_t}^i + v_{3_t}^i + \ldots + v_{n_t}^i \tag{4}$$

ahol a $TUK_{i_t}^{autó}$ teljes üzemi költség és az $v^i_{n_t}$ a független változók a t szimulációs időnél, valamint az i piaci szegmensnél.

A gépkocsi iparban használatos gyakorlat alapján [40, 41], a személyautók szegmensei a következő osztályokra lettek csoportosítva: alsó-, alsó-közép, felső-közép és felső osztály. Ezt a négy kategóriát és reprezentatív autókat alkalmazva mindegyikre melyeknél ismert a piaci részesedés [40], felrajzolható a TÜK, illetve az Utazási Büdzsé és a piaci részesedés görbe. Vizsgálataink értelmében, a görbe amely ráilleszthető ezen pontokra (TÜK-piaci részesedés), az alábbi hatványos egyenlettel jellemezhető:

$$P_{i_i} = a_t * TUK_{i_t} \wedge b_t \tag{5}$$

ahol a t szimulációs időnél P_{i_i} a piaci részesdés, TUK_{i_t} az i piaci szegmens teljes üzemi költsége, valamint a_t, b_t az egyenlet ismeretlen paraméterei. Meghatározásukhoz, a



1. ábra. A kidolgozott kisrepülőgép előrejelző modell vázlata.

legkisebb négyzetek módszere [42] lett alkalmazva, köszönhetően a görbeillesztés pontosságának analízisében megfigyelt előnyének.

Felhasználva az a_t, b_t paramétereket valamint a (3)-as (4)-es egyenleteket, az utazási büdzsé kifejezhetővé válik a teljes piaci részesedés függvényében. Mindazonáltal, hogy megkapjuk a lakosságra vetített utazási büdzsét, a modell meghatározza az összes autó tulajdon és a lakosság hányadát. Különböző modellek vizsgálata után, végül a Dargay [43] munkáira épülő S-görbe lett kiválasztva ehhez a feladathoz. A választás igazolása a számos előnnyel magyarázható, például az ország specifikus adathalmaz, amely figyelembe veszi az eltérő európai jellegzetességeket. Ennek tükrében, az összes autó tulajdon az alábbi egyenlettel adott:

$$V_t = \gamma * \exp[\alpha * \exp(\beta * GDP_t)] \tag{6}$$

ahol V_t jelöli a lakosságra vetített összes személyautó tulajdont, GDP_t a GDP, és α, β, γ a Gompertz S-görbe paraméterek Dargay [43] alapján.

Mindezeket felhasználva, és az analógiai megközelítést alkalmazva, az EK elérhetőséget az (7). egyenlet adja meg az alábbiak szerint:

$$EK_t = [a_t * TUK_t^{EK} \wedge b_t] * [\gamma * \exp(\alpha * \exp(\beta * GDP_t))] \tag{7}$$

ahol minden t szimulációs időnél az európai kisrepülőgép (EK_t) a (3). egyenlet (a_t, b_t) paraméterei; (α, β, γ) Gompertz görbe mutatói; az EK teljes üzemi költsége (TUK_t^{EK}); és végül a GDP (GDP_t) függvényében adott.

6. Monte Carlo Szimuláció

Az EK és a személyautók 2006-os TÜK értéke számos kisrepülőgép, illetve személyautó költségszámításának átlagértékén alapszik. Azonban a jövőbeli TÜK becsléshez bizonytalan faktorokkal kellett szembe nézni, mivel az egyes költség elemek alakulása nem tisztázott. Így egy Monte Carlo Szimuláció (MCS) alkalmaztam, hiszen ez egy valószínűség számításon alapuló módszer, amely az egyszerű szcenáriókhoz illetve regressziókhoz képest számszerűleg képes reprezentálni a bizonytalan faktorokat.

Ebben a munkában, számos eloszlás sűrűségfüggvényét alkalmaztuk a MCS alatt. Elsőként egy egyenletest, azokban az esetekben ahol semmilyen információ nem állt rendelkezésre az egyes értékek jövőbeli valószínűségéről. Általánosan ezek az EK paraméterei. Példaként a kisrepülőgép professzionális illetve személyes pilótaként is üzemeltethető könnyen kezelhető légi jármű lehet [2, 6], mely hasonlóan a PATS [2, 6], illetve a Small Aircraft Transportation System High Volume Operation [44] projektekhez az új fedélzeti rendszerek alkalmazásával csökkentheti a pilóta elvárt gyakorlati tudását egészen a személyautó szintjére. Ezen felül, a repülések irányított, illetve FIR (Flight Information Region) légterekben is történhetnek VFR (Visual Flight Rules) alapján, amely a EUROCONTROL jelenlegi díjszabási rendszere alapján [45] irrelevánssá teheti az en-route navigációs díjakat. Ami a repülőtereket illeti, az EK használhatja mind a fő (a jobb kiszolgálás érdekében), mind a mellék repülőtereket ahol alacsonyabb költségekkel számolhat. Végül az EK követheti a múltbeli tulajdoni és karbantartási költségeket, illetve lecsökkenhet a mai luxusautók szintjére, ahogyan az a SATS [8] és SkyCar [46] programokból adódik a megbízhatóbb alapanyagok és egyéb új technológiák (mint a MEMS [34], a nanotechológia [35]) alkalmazásával példaként a meghajtásrendszer vagy az aerodinamikai formatervezés területén. Ami az EK és személyautó üzemanyag fogyasztás; személyautó tulajdoni, karbantartási és autópálya költséget illeti, egy normál eloszlás lett alkalmazva, mert ezek jövőbeli pont értékei adottak az irodalomban [41].

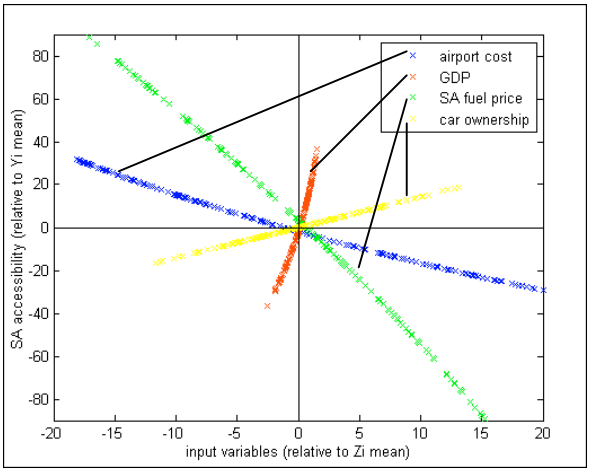
Végül az üzemanyag ár és a GDP változók esetére egy háromszög eloszlást alkalmaztam, ami az általános gyakorlat [47] mikor mind a minimális, maximális, illetve a legvalószínűbb értékek ismeretesek.

7. Érzékenységi vizsgálat

Tudván, hogy a bemeneti paraméterek bizonytalansága befolyásolhatja az eredménnyel összefüggő bizalmat (különösen a további döntés előkészítés és kockázat elemzés területén), a modell tárgyhoz tartozását érzékenységi vizsgálattal is bebizonyítottam. Ehhez az irodalomban több eljárás is fellelhető [48]. Ez a vizsgálat a legtöbbet használt, a Monte Carlo mintavételen alapuló módszert alkalmazta, mivel ez figyelembe veszi az egyes változókhoz

csatolt valószínűségi sűrűségfüggvények jelenlétét [48]. A Z_i változók N értékeit az Y_i kimeőjelek függvényében ábrázoltam egy grafikonon, hiszen ez lehetővé teszi a nemlineáris kapcsolatok vizsgálatát, valamint a paraméterek érzékenységéből adódó eltérések megjelenítését. Példaként, ha az eredmény függ egy adott bemeneti változótól (Z), akkor a grafikonon az N értékekből adódó Y_i pontok halmaza egy egyenest illetve egy görbét kell hogy adjon. Ezzel szemben, a véletlenszerűen eloszló Y_i pontok jelenléte bizonyíték arra, hogy az adott bemeneti változó alig, vagy nem befolyásoló tényező a kidolgozott modellben [R8].

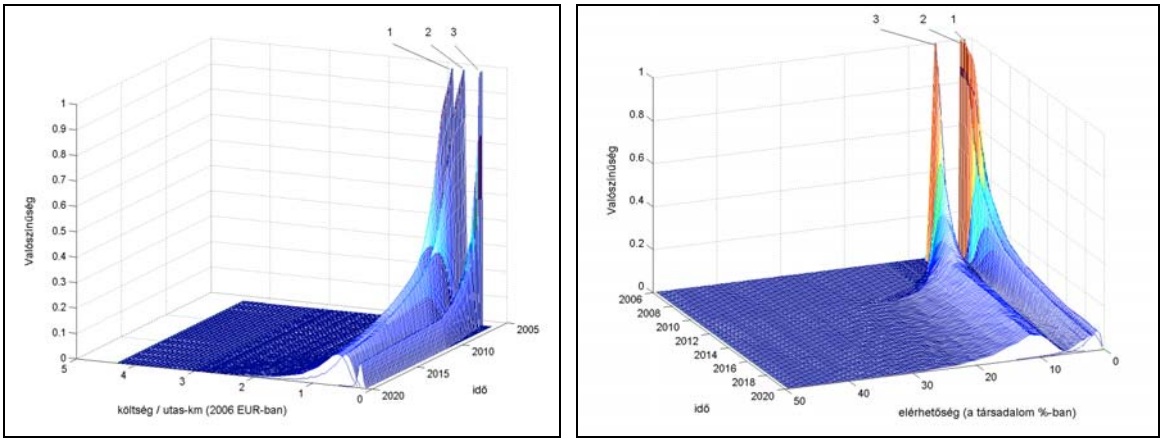
Mivel az összes paraméter érzékenységi vizsgálatának analízise túlzottan összetett eljárást ígényel, itt a teljes vizsgálat csak egy korlátozott számú példáját ismertetem. Ennek jegyében, a repülőtéri költség, a GDP, az üzemanyag ár és a személyautó tulajdoni költség mint bemeneti változók (Z_i) hatása a 2. ábrán adott. Ahogyan az mutatja, számos Z_i és Y kapcsolat egy nemlineáris görbét eredményez, amely bebizonyítja a nemlineáris összefüggést az eredmény és a bemeneti változók között. Különben a kapcsolatok előjele is ésszerű, hiszen ahogyan azt elvártuk az irodalmi áttekintés után, a kisrepülőgépes elérhetőség növekszik a GDP, illetve a személyautók tulajdonlásának gyarapodásával, és csökken a növekvő repülőtéri / üzemanyag költségekkel. Ráadásul a bemenőjelek N pontjai görbét eredményeznek a grafikonon, amely egyértelműen bizonyítja, hogy az eredmény függ a változóktól és egy paramétert sem lehet figyelmen kívül hagyni. Ezeknek a jellemzőknek köszönhetően a 2. ábra egyben bizonyíték a kidolgozott előrejelző modell tárgyhoz tartozásához.



2. ábra. Az előrejelző modell érzékenységi vizsgálatának eredménye.

8. Főbb eredmények

A Monte Carlo Szimuláció miatt, a modell eredmények valószínűségi



3. ábra A EK teljes üzemi költsége (balra, EUR / utas-km-ben) és elérhetősége (jobbra, a társadalom %-ban) 2006 és 2020 között (1: dugattyús, 2: gázturbinás légcsavaros, 3: sugárhajtású).

sűrűségfüggvénnyel adottak [R1, R2, R12]. A 3. ábra a főbb eredményeket ábrázolja; a kisrepülőgépek teljes üzemi költség, és elérhetőség alakulását. Ami az előbbit illeti, 2020-ban a legvalószínűbb eredmények a 0.2, 0.45 és 0.59 EUR / utas-km-t adják a dugattyús, gázturbinás légcsavaros és sugárhajtású kisrepülőgépek esetére. Ezek, a 2006-ban megfigyelt eredmények tükrében, csökkenő TÜK tendenciát mutatnak a teljes szimuláció időtartalma során. Míg a dugattyúst illetően a fenti érték körüli eloszlás általánosan véve kiegyensúlyozott, a gázturbinás légcsavaros és a sugárhajtású kisrepülőgép esetére 0.65 illetve 0.63 a valószínűsége annak, hogy 2020-ban végül magasabb TÜK eredmény adódik. Ami az elérhetőséget illeti, a legvalószínűbb szimulációs eredmények 2020-ban a 11.7, 2.35, illetve az 1.8 % értékhez tartoznak a dugattyús, gázturbinás légcsavaros és a sugárhajtású kisrepülőgép esetében. Ezek az eredmények azt tükrözik, hogy példaként a dugattyús európai kisrepülőgép 2020-ban a társadalom 11.7 %-a számára elérhetővé válik, 94.5 %-os növekedést mutatva a 2006-ban kapott értékhez képest. Míg a szimulációs eredmények magasabb százalékú elérhetőséget is megadnak, általánosan ezek valószínűsége alacsony, például 0.029, 25 % feletti elérhetőség esetében.

9. Tézisek

1. Megállapítottam, hogy az Európai kisrepülőgép fejlődése lényegében az ország specifikus (szociális-gazdasági) adatoktól (mint a GDP, az utazásra fordított költség), illetve az EK teljes működési költségét befolyásoló tényezőktől függ, például a technológiai fejlődésétől (mint a fejlett aerodinamikai formatervezés, új / alternatív hajtásrendszer, kevesebb szakértelmet kívánó egyszerűsített pilótafülke műszerezettség, automatizált légijármű üzemeltetés) [R2, R6].

   1.1 Analíziseim megállapították [R6, R9, R10], hogy míg az 1950-től 1995-ig terjedő időszakban szinte nem történt fejlesztés az EK-hoz hasonló gépek területén – és így annak hatása a kisrepülőgép előrejelzése szempontjából általánosan nem lett figyelembe véve – úgy 2006-ban a technológia előrehaladása egy radikálisan új, és relatív olcsó kisrepülőgépek megjelenéséhez vezet (hasonlóan a Small Aircraft Transportation System, a UK Jetpod, illetve SkyCar projektekhez), és ezzel az EK modellezésének egyik fő eleme.

   1.2 Bebizonyítottam [R6, R10], hogy a technológia vívmányai az automatika [6], a pilótafülke fejlesztés (például magas színvonalú meteorológia tájékoztatás, új összetett műszerek alkalmazása), és az első üzemeltetési elképzelések (mint a High Volume Operations) területén lehetőséget adnak arra, hogy a kisrepülőgép pilótája kevesebb szakértelmet kívánjon, és az EK üzemeltetési nehézsége megközelítse a személyautók szintjét.

   1.3 Vizsgálataim felderítették, hogy az Európai kisrepülőgépek fejlődése a lakosság utazási büdzséjétől is függ, amely a társadalom – a teljes hazai termék adott százalékaként előálló – utazásra fordított költsége [R1, R2, R8, R12].

   1.4 Meghatároztam [R4], hogy az EK fejlődést befolyásoló tényezők különböznek azoktól, amelyek az Amerikai Egyesül Államok területén tapasztalt kisrepülőgépes aktivitást jellemzik, hiszen Európa (i) különböző országból tevődik össze eltérő gazdasági adatokkal és közlekedési jellemzőkkel, (ii) társadalma ugyanazon a teljes hazai termék értéken átlagosan háromszor kevesebbet utazik mint az Észak-Amerikaiak, (iii) népsűrűsége nagyobb, (iv) valamint gyorsvasúthálózattal bír.

2. Megállapítottam, hogy Európában a kisgépek forgalmának növekedése a polgári repüléssel kapcsolatban konfliktus helyzeteket okoz egész Európát lefedően [R3, R7, R9, R11].

   2.1 Az FAA kisrepülőgépekre vonatkozó súlykorlátja alapján, a CFMU valós repülési adatokat felhasználva meghatároztam az Európai kisgépes repülés jellemzőit (mint az átlagos napi forgalom, a repülési távolság, a repülési magasság, az alkalmazott hajtásrendszer), illetve területi lefedettségét [R3, R7, R9, R11].

   2.2 Repülésbiztonsági kritériumként meghatároztam a kisgépes, nagygépes forgalom által határozott közösen használt légterek minimum értekét [R3].

   2.3 A kisgépes, nagygépes forgalom által határozott közösen használt légterek minimum értékéből adódó repülésbiztonsági kritériumot felhasználva meghatároztam, hogy a légtérhasználatból adódó lehetséges konfliktus helyzetek a repülőterek körüli 130 km-es szakaszát érinti [R3, R9].

3. Megállapítottam, hogy az általánosan használt előrejelző modellek nehezen alkalmazhatóak a kisgépes repülés fejlődésének előrejelzésére [R5].

   3.1 Bebizonyítottam [R3], hogy a rendelkezésre álló amerikai kisrepülőgép előrejelző modellek használata az európai célokra nem alkalmazható, mivel Európa (i) számos eltérő gazdasági / közlekedési sajátosságokból tevődik össze, (ii) gyorsvasúthálózattal bír, valamint (iii) főbb városainak távolsága különbözik az amerikaiakétól, ami még a felhasznált hajtásrendszert is befolyásolhatja.

   3.2 Igazoltam [R5], hogy a nagygépes forgalomban általánosan használt előrejelző modellek (például a log-lineáris vagy a multikritériális regressziós modellek) használata nem célszerű az Európai kisrepülőgépek alkalmazására, mivel azok az EK esetében csak a hiányosan felderíthető múlt adataira épülnek, míg a rendelkezésre álló alapadatok pedig nem képesek a kisrepülőgépes fejlődést valósan befolyásoló paramétereit tükrözni (például a pilótafülke fejlődést, vagy a csökkent teljes üzemi költséget).

   3.3 Megállapítottam [R5], hogy a lineáris módszerek (vagy azok, amelyek lineáris elaszticitás értéket adnak) nem alkalmazhatóak az Európai kisrepülőgépes fejlődés előrejelzésére, hiszen nem tudják figyelembe venni a piac különböző nem-lineáris adoptálási szakaszait, és a társadalmi rétegek eltérő ár / jövedelem érzékenységi faktorait.

4. A kisrepülőgép sztochasztikus adoptálási folyamata alapján, létrehoztam egy Markov diffúziós modellt, amely statisztikai linearizálás után egy kezdetleges Európai kisrepülőgép előrejelző modellt adott [R3, R5, R7, R11].

   4.1 Az Európai kisgépes légi forgalom fejlődése alapján meghatároztam a kisgépes fejlődést meghatározó főbb tényezőket [R3, R5].

   4.2 Megállapítottam, hogy a kezdetleges Európai kisrepülőgép előrejelző modell alapját két lineáris mátrix képzi, melyek közül az A mátrix a folyamat belső dinamikáját, illetve a B a külső (irányítási szabályozási) befolyásolást veszi figyelembe [R3, R5].

   4.3 A különböző szenáriók alkalmazásával és az A illetve B mátrix elemek variálásával folytatott vizsgálatok alapján bizonyítottam a kezdetleges Európai kisrepülőgép előrejelző modell alkalmazhatóságát [R7, R11].

4.4 Megállapítottam [R3, R5], hogy a kezdetleges Európai kisrepülőgép előrejelző modell legfőbb előnyei, hogy egyrészről lehetőséget ad arra, hogy előre definiáljuk az egyes modell elemek súlyát / szerepét, másrészről képes a modell belső dinamikáját elemezni (például a regulációk vagy a technológia fejlődésének hatását a kisrepülőgép forgalomra)

4.5 Az Európai kisrepülőgépről jelenleg rendelkezésre álló alapadatok alapján megállapítottam, hogy a kezdetleges EK előrejelző modell hátránya a csak korlátozottan azonosítható A illetve B mátrix elemek [R5].

5. Az innovációs diffúziós elméletből ismert és a személyautók elterjedésének vizsgálatában alkalmazott S-modellből, mint analóg modellből kiindulva, kifejlesztettem egy általános nemlineáris előrejelző modellt az Európai kisgépes repülés elérhetőségének leírására [R1, R2, R8, R12].

5.1 A kidolgozott nemlineáris EK előrejelző modell alkalmazásához kifejlesztettem egy eljárást a kisgépes repülés teljes üzemi költségének számítására [R2, R8].

5.2 A nemlineáris kisrepülőgép előrejelző modell paramétereinek tárgyhoz tartozását érzékenységi vizsgálattal teszteltem [R12].

5.3 Valós adatok felhasználásával (korábbi adatokból jelenlegi helyzetre) a kidolgozott nemlineáris kisrepülőgép előrejelző modellt validáltam, öt eves előrejelzésre átlagosan 6 %-os hibával.

5.4 A kidolgozott nemlineáris Európai kisrepülőgép előrejelző modell alkalmazhatóságát Monte Carlo Szimulációval bebizonyítottam [R1, R2].

10. Publikációs lista

Idegen nyelvű lektorált folyóirat (Magyarországon megjelent):

R1. Rohacs, D.: "The European Small Aircraft's Total Operating Cost and Accessibility Evolution: a probabilistic prediction for 2020". *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, Extra number: 60 Years Jubilee of the Department of Aircraft and Ships, BUTE, Budapest, Hungary, 2007.

Magyar nyelvű lektorált folyóirat (Magyarországon megjelent):

R2. Rohacs, D.: "Kisrepülőgépek Elérhetőségének Hosszútávú Előrejelzése" (Long-term Prediction of Small Aircraft Accessibility). *Repüléstudományi Közlemények*, ZNNE Repülőtiszti Intézet, Szolnok, Hungary, April 20, 2007.

Idegen nyelvű nemzetközi részvételű lektorált konferencia cikk:

R3. Rohacs, D.: "An Initial European Small Aircraft Prediction Model for 2020". In *Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, Belgrade, Serbia and Montenegro, June 24-28, 2006.

Idegen nyelvű nemzetközi részvételű nem lektorált konferencia cikk:

R4. Rohacs, D., Brochard, M., Lavallee, I. and Gausz, T.: "Analysis of the Impact of a Future Small Aircraft on ATM in Europe". In *Proceedings of the 9th Air Transport Research Society World Conference (ATRS)*, Rio de Janerio, Brazil, July 3-7, 2005.

R5. Rohacs, D.: ”Potential European Small Aircraft Prediction and Demand Models”. In *Proceedings of the 6th International Conference on Nonlinear Problems in Aviation and Aerospace (ICNPAA)*, Budapest, Hungary, June 21-23, 2006.

R6. Rohacs, D., Brochard, M., Lavallee, I. and Gausz, T.: “Analyze the Impact of Small Aircraft on ATM in Europe”. In *Proceedings of the 3rd Innovative Research Workshop and Exhibition*, EUROCONTROL, Experimental Centre, Brétigny sur Orge, France, December 9-10, 2004.

R7. Rohacs, D., Brochard, M., Lavallee, I. and Gausz, T.: ”Preliminary Analysis of Small Aircraft Traffic Characteristics and its Interaction on ATM for European Market Attributes”. In *Proceedings of the 4th Innovative Research Workshop and Exhibition*, EUROCONTROL, Experimental Centre, Brétigny sur Orge, France, December 6-8, 2005.

R8. Rohacs, D.: ”The Effect of Income and Total Operating Cost on Small Aircraft Accessibility in Europe: a prediction for 2020”. In *Proceedings of the 5th Innovative Research Workshop and Exhibition*, EUROCONTROL, Experimental Centre, Brétigny sur Orge, France, December 5-7, 2006.

Idegen nyelvű helyi részvételű nem lektorált konferencia cikk:

R9. Rohacs, D., Brochard, M., Lavallee, I. and Gausz, T.: ”Preliminary Analysis of Small Aircraft Interaction Modeling on European ATM”. In *Proceedings of the 15th Hungarian Aeronautical Days Conference*, Budapest, Hungary, December 1-2, 2005.

Nem lektorált kutatási beszámoló:

R10. Rohacs, D.: “Analysis the Impact of a Future Small Aircraft on ATM in Europe”. *Activity Report 2004*, EUROCONTROL Experimental Centre, Innovative Research Area, Brétigny sur Orge, France, 2004.

R11. Rohacs, D.: “Preliminary Analysis of Small Aircraft Traffic Characteristics and its Impact on European ATM Parameters”. *Activity Report 2005*, EUROCONTROL Experimental Centre, Innovative Research Area, Brétigny sur Orge, France, 2005.

R12. Rohacs, D.: “Probabilistic Prediction of the European Small Aircraft Accessibility for 2020”. *Activity Report 2006*, EUROCONTROL Experimental Centre, Brétigny sur Orge, France, 2006.

11. Felhasznált irodalom

1. Schafer, A.: “The Global Demand for Motorized Mobility”. *Transportation Research A*, 32(6), pp. 455-477, 1998.
2. Rohacs, J.: “PATS – Personal Air Transportation System”. In *Proceedings of the 24th International Congress of Aerospace Sciences (ICAS)*, Toronto, Canada, September 2002.
3. Airbus: “Global Market Forecast 2003-2022”. December 2003.
4. EUROCONTROL: “EUROCONTROL Long-Term Forecast: IFV Movements 2006-2025”. EUROCONTROL Statistics and Forecast Service (STATFOR), edition number: v1.0, December 2006.
5. Moore, M.D.: ”Personal Air Vehicles: a Rural/Regional and Intra-Urban on-Demand Transportation System”. *Journal of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*, no. 2003-2646, 2003.

6. Rohacs, D., *Nouveau système de contrôle automatique pour de petits avions*, Institut National des Sciences Appliquée de Lyon & BUTE, Lyon, France, July 2004.

7. Gundlach, M., Rohacs, J.: "Regional Flight 2000". *Technical Reports by the Hungarian and Bavarian government*, report number I - III, BUTE - Budapest, Dornier - München, RHTW - Aachen, 1991-93, 2000.

8. Holmes, B.J., Durhan, M.H., Tarry, S.E.: "Small Aircraft Transportation System Concept and Technologies". *Journal of Aircraft*, Vol. 41, No.1, January-February 2004.

9. AVCEN Limited: Maker of UK JETPOD aircraft. *The Official Web site of AVCEN*. http://www.avcen.com/index3.php (05/04/2005)

10. Bailey, R. E., Parrish, R. V., Kramer, L. J., Harrah, S. D., Arthur, J. J.: "Technical Challenges In the Development of a NASA Synthetic Vision System Concept" *AIAA Paper* 2002-5188, Hampton, NASA Langley Research Center, 2002.

11. Stough, H.P., Martzaklis, K.S.: "Progress in the Development of Weather Information Systems for the Cockpit". *SAE Paper*, n. 2002-01-1520, 2002.

12. Möller, H., Sachs, G.: "Synthetic Vision for Improving Flight control in Night, Poor Visibility and Adverse Weather Conditions". In *Proceedings of the 13th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference (DACS)*, pp. 286-291, Phoenix, USA, 1994.

13. Moravszky, Cs., Rohács, J., Hermle, P., Sachs, G.: "Electronic Flight Display Development Supported by Commercial-off-the-Shelf Tools". In *Proceedings of the 22nd Congress of International Council of Aeronautical Science (ICAS)*, Harrogate, UK, 2000.

14. Snow, P., Alter, K., Davis, R.C.: "Challenges of Reducing Landing Minima and Enabling Single-Pilot Operations Through the Use of Synthetic Vision/Highway-in-the-Sky Technologies". In *Proceeding of the 24th Digital Avionics System Conference* (DASC), Washington, D.C., USA, 2001.

15. Wikipedia contributors: "Global Positioning System". *Wikipedia*, The Free Encyclopedia. http://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System.html (15/03/2007).

16. Borelli, G.S.: "ADS-B to Link 16 Getaway Demonstrations: investigation of a low cost ADS-B option". In *Proceedings of the 23rd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Salt Lake City, USA, October 2004.

17. Embraer: "Embraer Market Outlook". *Embraer*, 3rd Edition, November 2006.

18. Singleton, J.: "VLJ Use Expected to Match Fractionals". *Flight International*, 7-13 March 2006.

19. Forecast International: "Business Aviation Market Forecast". *Forecast International*, July 2006.

20. Honeywell: "Business Aviation Outlook 2005". *Honeywell*, November 2005.

21. Condom, P.: "Personal Jets Proliferate". *Interavia*, v. 682, pp. 24-27, 2005.

22. Rolls-Royce: "2005 Business Jet Review and Forecast". *Rolls-Royce*, Orlando, USA, November 2005.

23. International Herald Tribune: "Air Taxis Hope to Gain From Business Fliers' Pain". *International Herald Tribune*, 27 August 2006.

24. Oum, T.H.: "Alternative Demand Models and their Elasticity Estimates". *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 23., no. 2, pp. 163, May 1989.

25. Cobb, C.W., Douglas, P.H.: "A Theory of Production". *American Economic Review*, 18 (Sepplement), pp. 139-165, 1928.

26. Liao, T. F.: "*Interpreting probability models: Logit, probit, and other generalized linear models*". Sage Publications Inc., ISBN-10: 0803949995, Thousand Oaks, USA, January 1994.

27. Borooah, V.K.: "*Logit and probit*". Sage Publications, ISBN: 9780761922421, Thousand Oaks, USA, 2002.

28. Oum, T.H., Gillean, D.W.: "Demands for Fareclasses and Pricing in Airline Markets". *Logistics and Transportation Review*, Vol. 23, 1986.

29. Gillen, D.W., Oum, T.H., Tretheway, M.W.: "Identifying and Measuring the Impacts of Government Ownership and Regulation on Airline Performance". *Economic Council of Canada*, Discussion paper no. 326, Canada, 1987.

30. GRA Incorporated: "Forecasting Aviation Activity by Airport". *Federal Aviation Administration*, Office of Aviation Policy and Plans, Statistics and Forecast Branch (APO-110), Washington, DC, July, 2001. http://www.faa.gov/data_statistics/aviation_data_statistics/forecasting/media/AF1.doc (17/02/2006)

31. EUROCONTROL Experimental Centre: "DANCE web site". *EUROCONTROL Experimental Centre*, Intranet Access. https://ww-local.eurocontrol.fr/research/shorttermsupport/dancefolder/index.html (20/04/2007)

32. Stouffer V.: "Design document for European Air Carrier Investment model". *Logistic Management Institutes*, Working document, EU201L2, May 2002.

33. Wingrove E.R., Gaier E.M., Santmire T.E., The ASAC Air Carrier Investment Model (Third generation), *Logistic Management Institutes*, NASA/CR-1998-207656, April 1998.

34. Ho, C-M., Tai, Y-C.: Review: MEMS and its application for flow control. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp 437-447, 1996.

35. Goldin, D.S.: "Aviation Daydreaming". *SAE World Aviation Congress*, San Francisco, USA, October 1999.

36. Nicholas, G. C.: "The Z curve an IT Investment". An online newsletter form Nicholas G. Carr Issue #3: May 27, 2004 http://www.nicholasgcarr.com/digital_renderings/archives/the_z_curve_and_it.shtml (03/22/2006)

37. Zahavi, Y.: "The UMOT-Urban Interactions". *US Department of Transportation*, DOT-RSPA-DPB 10/7., Washington D.C., 1981.

38. Atkinson, A. A., Banker, R. D., Kaplan, R. S., Young, S. M.: "*Management Accounting*". Second edition, ISBN: 0131732811, Prentice-Hall International, New Jersey, 1997.

39. Givoni, M. :"Evaluating aircraft and HST operating costs", in "*New trends in the European air traffic. NECTAR Cluster 1 Workshop Networks Land Use and Space*", Cederlund K., Ulf S. (Eds), Department of Social and Economic Geography, Lund University, Sweden, 2003.

40. Comite des Constructeur Français d'Automobiles: "L'industrie Automobile Française, Analyse et Statistiques". *Comite des Constructeur Français d'Automobiles*, Edition 2005.

41. Bonotaux, J., Chanut, J. M., Monestier, M. P. and Rouch, J. M.: "Automobile, Carburants, Réparations: 20 ans d'évolution des prix". *Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) PREMIERE*, Division prix à la consommation, N-713, May 2000.

42. Abdi, H.: "Least-squares". In Lewis-Beck, M., Bryman, A., Futing, T.: *Encyclopedia of Social Science Research Methods*. pp. 792-795, SAGE Publications, ISBN-10: 0761923632, Thousand Oaks (CA), December 2003.

43. Dargay, J., Gately, J.: "Income's Effect on Car and Vehicle Ownership Worldwide: 1966-2015". *Transportation Research*, Part A 33 (1999) 101-138

44. Croft, J.: "Small airports for mega mobility". *Aerospace America*, November 2005.

45. EUROCONTROL: "*Customer guide to charges*". EUROCONTROL, Central Route Charges Office, version 3.2, October 2006.

46. Lahore, H.: "Executive SkyCar Summary". *The Official Web site of the Skycar*. www.skyair.org/Skycar/summary_1995_98.html (13/03/2007)

47. Evans, M.; Hastings, N.; and Peacock, B. "Triangular Distribution". In *Statistical Distributions*, 3rd ed. pp. 187-188, ISBN-10: 0471371246, Wiley, New York, 2000.

48. Isukapalli, S.S.: "*Uncertainty Analysis of Transport – Transformation Models*". PhD Thesis, Rutgers, The State University of New Jersey, New Brunswick, NJ, U.S.A., January 1999.