

## A KOSZOVÓI MAGASLÉGTÉRI IRÁNYÍTÁSI RENDSZER GRÁF-MODELLEZÉSE

### GRAPH MODELLING OF THE KOSOVO UPPER AIRSPACE AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM

POKORÁDI László; SOMOSI Vilmos

(ORCID: 0000-0003-2857-1887); (ORCID: 0000-0002-4763-2174)

[pokoradi.laszlo@bkgk.uni-obuda.hu](mailto:pokoradi.laszlo@bkgk.uni-obuda.hu); [vilmos.somosi@hungarocontrol.hu](mailto:vilmos.somosi@hungarocontrol.hu)

#### Absztrakt

A 15 év elteltével újra megnyitott Koszovó feletti magas légtér, a HungaroControl Zrt. által nyújtott távoli körzeti légiforgalmi irányítás nagyobb mozgásszabadságot és rövidebb repülési útvonalakat biztosít a térségen átrepülő nemzetközi légi forgalom számára. A közlekedési és kommunikációs hálózatok, hatékony matematikai modellezésének egyik eszköze a gráfelmélet. Egy hálózat vizsgálatának első fontos állomása az elemek közti – sok esetben bonyolult kölcsönhatásokat is jelenthető – kapcsolatok tényének feltárása és gráfban történő ábrázolása. Gráfon csomópontok és élek halmazát értjük melyben csomópontokat éllel kötünk össze. A tanulmány gráfmodellezésen keresztül ismerteti a térségben üzemelő légtér-felderítési rendszerek, valamint a magyar léginnavigációs szolgáltató (HungaroControl Zrt.) közötti adatkapcsolatok sajátosságait.

**Kulcsszavak:** gráf-modellezés, radarkapcsolati hálózat, távoli körzeti légiforgalmi irányítás, Koszovó magaslégtér

#### Abstract

After 15 years the Kosovo upper airspace was re-opened, and the remote en-route air traffic services by HungaroControl provide more freedom and optimised routes for international air traffic operating through this region. Graph theory is one of the tools of the efficient mathematic modelling of the transport and communication systems. The first significant step in the network analysis is the exploration and visualization of the relationship (dependency) between the elements, which can also represent complex interactions among them. Graph is a conglomeration of edges and junctions where the junctions are connected with edges. This article introduces the special data connectivity of surveillance systems and the Hungarian Air Navigation Service Provider (HungaroControl) by Graph-analysis which is an efficient tool for modelling such a complex transport and communication networks.

**Keywords:** Graph modelling, radar data network, remote ATS, Kosovo upper airspace

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.09.01.  
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.11.02.

## BEVEZETÉS

Jelentős mértékben átalakította az európai légitrafordulást a 15 év elteltével újra megnyitott Koszovó feletti magas légtér<sup>1</sup>, amely így nagyobb mozgásszabadságot és rövidebb repülési útvonalakat biztosít a térségen átrepülő nemzetközi légi forgalom számára. A forgalmi átrendeződés mellett külön iparági előrelépésnek tekinthető, hogy a HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt. – a NATO-felkérés alapján teljesített – az országhatárokon átívelő légiforgalmi irányításhoz szükséges radaradatok és levegő-föld kommunikációs kapcsolatot a térségben már telepített és üzemelő rendszereket üzemeltető léginavigációs szolgáltatóktól vásárolja. A világon elsőként megvalósult költségvetéskorrigált megoldást az egymással nem szomszédos országok közötti, több határon átnyúló együttműködése, továbbá különleges és innovatív megoldások bevezetése tette lehetővé.

Rendszerszemléletű elemzés esetén a légiforgalmi irányítási rendszer, illetve folyamat hálózati struktúrájának tekinthető. A gráfelmélet a matematika, ezen belül a kombinatorika egyik fontos ága. Története a königsbergi hidak híres matematikai problémájával kezdődött, amit Leonhard Euler oldott meg 1736-ban. A gráfelmélet felhasználásával a különböző hálózatokat, hálózati struktúrájú rendszereket és folyamatokat tudunk matematikai modellel hatékonyan leírni és – a kívánt szempont alapján – elemezni.

A gráfelméletnek és mérnöki alkalmazásának kiterjedt matematikai és műszaki szakirodalma található. A technikai folyamatok leírásához szükséges gráfelméleti alapismeretek olvashatók a két Korn [1], illetve Pokorádi [2] könyvében. Alkalmazásukra láthatunk példákat a [3] és [4] publikációkban. Csiszér kutatásainak célja a hálózatok minőségügyi felhasználási lehetőségeinek feltárása, főleg a folyamatfejlesztési szempontokat helyezve az elemzések középpontjába [5], [6]. Zentai a kritikus infrastruktúrák hibátűrését, illetve támadásokkal szembeni ellenálló képességét modellezte gráfelméleti eszközökkel, az infrastruktúrát leíró gráf többszörös összefüggőségét vizsgálva [7].

Tanulmányunk gráfelméleti elemzésen keresztül szemlélteti az országhatároktól és léginavigációs szolgáltatástól függetlenízhető úgynevezett távoli (remote) légiforgalmi irányítás technológiai környezetét, a radaradat hálózatok kritikus pontjait és kockázati elemeit. A dolgozat nem terjed ki a levegő-föld kommunikációs, illetve a légiforgalmi szolgálatok közötti hangfrekvenciás koordinációs kapcsolatokra, valamint a jeladatokat biztosító kommunikációs vonalakra, továbbá a légiforgalmi szolgálat adatfeldolgozó rendszereire. Tanulmányunkban a kialakított infrastruktúra elemzését a jelforrástól a jelfeldolgozásig és megjelenítésig (alkalmazói végpontig) végeztük el. A szolgáltatási környezetek és adatkapcsolatok modellezésével a rendszer elemei és a folyamat állomásai közötti kapcsolatot szemléltetjük. Az elemek közötti kapcsolatok tényének feltárásával, ábrázolásával a diszkrét állapotterű folyamatokat írjuk le gráfok segítségével [2].

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: Az 1. fejezet a történeti előzményeket ismerteti. A 2. fejezet koszovói magaslégtéri irányítási infrastruktúra mutatja be. A 3. fejezet adja meg a gráfelméleti alapokat. A 4. fejezetben a radaradat kapcsolati hálózatok vizsgálata olvasható. Végezetül a Szerzők összegzik tanulmányukat, valamint fogalmazzák meg a további kutatási lehetőségeket.

---

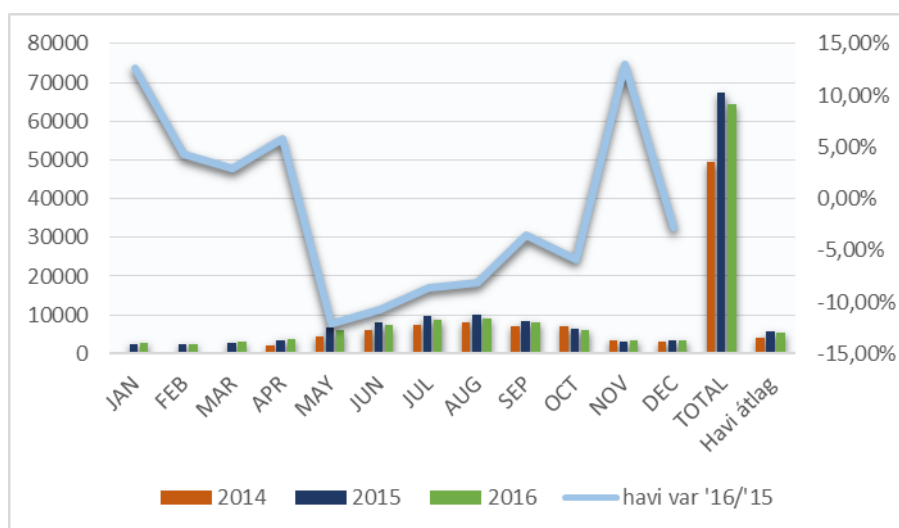
<sup>1</sup> Flight Level 205-660 (kb. 6200–20 000 méter) közötti repülési magasságtartomány

## TÖRTÉNETI ELŐZMÉNYEK

Az ENSZ Biztonsági Tanács 1244. sz. határozatának, valamint az 1999-es Katonai Műszaki Megállapodásnak megfelelően a NATO/KFOR<sup>2</sup> által ellenőrzött Koszovó feletti légtér lezárásra került és 15 éven keresztül elérhetetlen volt a polgári légiforgalom számára [8]. A rendeződő politikai viszonyok eredményeként tárgyalások kezdődtek az úgynevezett magas légtér újrainvitásáról, melynek részeként nemzeti léginavigációs szolgáltatók pályázhattak a térség légiforgalmi irányítói szolgáltatásának szerződéses alapon történő biztosítására.

Az eredményes pályázást követően az Észak-atlanti Tanács – a balkáni légiközlekedés normalizációja keretében hozott 2012. április 13-i döntését követően – felkérte Magyarországot, illetve a HungaroControlt a Koszovó feletti magas légtérben a polgári léginavigációs és a kapcsolódó hatósági feladatok ellátására [9]. A magyar kormány felajánlása szerint tehát a HungaroControl technikai lebonyolítóként működik közre a projektben, míg az ENSZ BT fent nevezett határozatának, valamint az 1999-es Katonai Műszaki Megállapodásának megfelelően a légtér továbbra is a NATO/KFOR fennhatósága alatt marad.

A légtér újbóli megnyitásától a repülési útvonalak rövidülése volt várható a térségben, amely jelentősen csökkenti a légtérhasználók üzemeltetési költségeit – az európai légiközlekedési hálózatmenedzserrel (EUROCONTROL Network Manager) közösen végzett előzetes számítások szerint a koszovói légtér igénybe vevő évi 180 ezer légi jármű (különösen az Európából a Közel-Keletre és Ázsiába irányuló forgalom) 370 ezer tengeri mérfölddel (kb. 670 ezer kilométerrel) repül majd kevesebbet. A légtér megnyitása így éves szinten 18 millió Euró üzemeltetési költségmegtakarítást eredményezhet a légitársaságoknak, de a környezeti terhelés is jelentősen csökkenhet az évi 24 ezer tonnával kevesebb üzemanyag felhasználásával és a 75 ezer tonnával kevesebb CO<sub>2</sub> károsanyag-kibocsátással [10]. Az európai légtér normalizációja és a technológiai megoldások modellezése-megvalósítása az Európai Bizottság Egységes Európai Égbolt célkitűzéseit is szolgálja, amelynek keretében az európai léginavigációs szolgáltatók magasabb repülésbiztonsági szinten és költséghatékonyabban és a késések csökkentésével biztosítják a légitársaságoknak az optimálisabb repülési útvonalakat [11].



1. ábra Koszovói légiforgalmi statisztika 2014-2016 [13]

<sup>2</sup> Kosovo Force

A HungaroControl jelentése szerint a koszovói légtér igénybevétele egyelőre elmarad az előzetes prognózishoz képest, de lassú, ám folyamatos emelkedési tendenciát mutat: az átrepülő forgalom 2014-ben 49.517 légi jármű volt, míg 2015. évben 67.405, 2016. évben pedig 64.405 gépmozgás volt [12]. A forgalom havi alakulását az 1. ábra szemlélteti [13].

## **A KOSZOVÓI MAGASLÉGTÉRI IRÁNYÍTÁSI INFRASTRUKTÚRA**

A HungaroControl 700 kilométeres távolságból, nem közvetlen országhatár-szomszédságban biztosítja az úgynevezett távoli körzeti légiforgalmi irányítást, amelyhez a szükséges adatokat és szolgáltatást a térségben már kialakított infrastruktúrát üzemeltető léginavigációs szolgáltatóktól vásárolja. A magyarországi központból nyújtott légiforgalmi szolgáltatáshoz három szolgáltatási elem tekintetében kellett biztosítani az országhatárokon átívelő folyamatos és redundáns kapcsolatot, a jelforrástól a jelfeldolgozásig és megjelenítésig (alkalmazói végpontig):

- a koszovói légtér lefedettségét biztosító radarok hálózata;
- levegő-föld kommunikációs kapcsolatot biztosító hálózatok;
- légiforgalmi irányító szolgálatok között hangkommunikációs kapcsolatok.

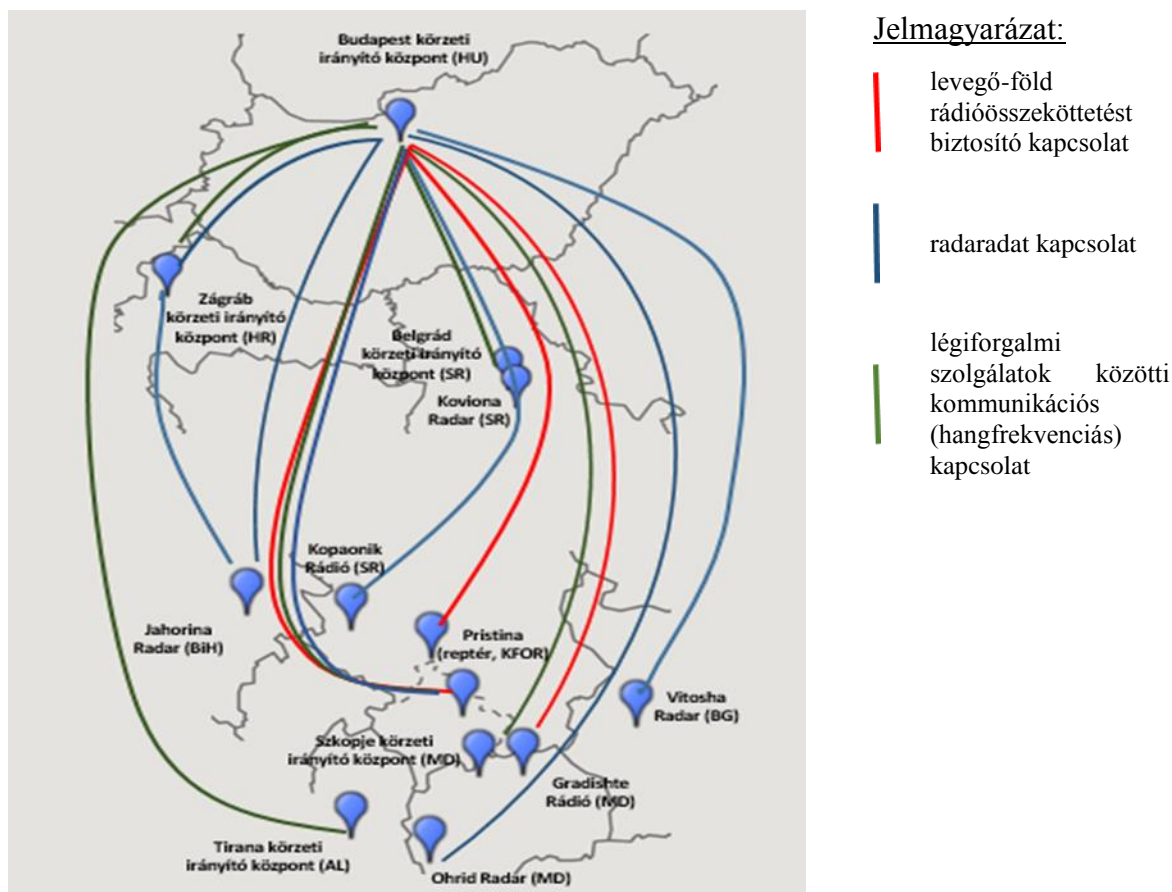
A HungaroControl folyamatos üzemeltetési feltételek teljesülése, illetve az abszolút (99,99%) biztosítottság érdekében megfelelő (két, illetve háromszoros) redundanciát, és hatékony munkatechnológiai eljárásokat alakított ki az adatforrásokra (lokátorok, rádióállomások), az adatkapcsolati hálózatokra, adatfeldolgozásra, és a feldolgozott adatmegjelenítés közötti hálózati elemekre vonatkozóan.

A légiforgalmi irányítói szolgáltatáshoz a térséget megfelelő redundanciával biztosított lefedő levegő-föld hangkommunikációs (rádió) kapcsolatot, radarlefedettséget, illetve a HungaroControl és a koszovói légtérrel szomszédos légiforgalmi irányító szolgálatok közötti kétoldalú földi hangkommunikációs (telefonos) kapcsolatot kellett kiépíteni. Az adatok továbbítását biztosító kereskedelmi szolgáltató szerződésben garantálja a minimum 99,8%-os szolgáltatási folyamatosságot.

A 2. ábra általánosságban szemlélteti a koszovói légtérben történő szolgáltatáshoz kiépített többnemzeti részvételű regionális (levegő-föld, és irányító egységek közötti) kommunikációs, illetve légtér felderítési környezetet. Hangsúlyozandó, hogy az ábrán szereplő adatkapcsolati vonalak nem tükrözik a hálózatok valóságos földrajzi elhelyezkedését, mivel a telekommunikációs szolgáltatók üzleti és védelmi szempontokra hivatkozva általában nem ismertetik a hálózati útvonalakat (nem kötelességük, de megegyezés szerint a közbeszerzés és a szerződéskötés során számukra előírható). Ebből adódóan jelen elemzés nem terjed ki a 4. ábrán  $e_1$ - $e_7$  élekkel jelzett hálózati réteg elemzésére.

Hangsúlyozandó azonban, hogy a távoli körzeti légiforgalmi irányítási infrastruktúra robusztusságának meghatározásában fontos elemet játszik az kommunikációs és adathálózatok, mint kritikus infrastruktúra elemeivel kapcsolatos kockázatok és követelmények feltérképezése is [14].

A kockázatok csökkentése érdekében javasolt a szolgáltatói szerződéseket több féllel is megkötni, illetve kikötni a hálózati útvonalak ismeretét, továbbá azon általános követelmény teljesülését, miszerint legyen mikrohullámú és földfelszín alatti hálózat rendelkezésre állása. A földi hálózat esetében TDM (Time Division Multiplexing) biztosítja az adatok védeltségét. A kommunikációs rendszerek fejlődése okán egyre inkább elterjedő IP alapú vonalak alkalmazásakor 256 bites titkosítás a minimum elvárás az ATM iparágban is egyre nagyobb jelentőséggel bíró kiberbiztonság (Cyber Security) érdekében (a kódolás a léginavigációs szolgáltató felelőssége).



**Jelmagyarázat:**

- levegő-föld rádióösszeköttetést biztosító kapcsolat
- radaradat kapcsolat
- légiforgalmi szolgálatok közötti kommunikációs (hangfrekvenciás) kapcsolat

**2.ábra** A koszovói magaslégtéri irányításhoz szükséges adatkapcsolatok [forrás: Szerzők]

A teljes függetlenség szavatolása érdekében, a hálózatokat biztosító szolgáltatók számára javasolt előírni, hogy nem bérelhetnek vonalakat egymástól (ez különösen fontos abban az esetben, ha nem ismertek a szolgáltatók hálózati útvonalai). Az IP alapú adattovábbítási technológia alkalmazása esetében a szerződésekben a szolgáltatás kiesésének kockázatát is kezelni kell. A rendszerbiztonság szempontjából kiemelt jelentőséggel bír, hogy a hálózat minden eleme (áramforrás, nyomvonal, berendezések) rendelkezzen redundanciával.

Amennyiben egy országból több szolgáltatás (például telefonos összeköttetés és radaradatok továbbítása) is biztosított, az adatok egy szerződés keretében biztosított vonalon keresztül érkeznek. A kialakított infrastruktúra alapja a Magyarországgal szomszédos léginnavigációs szolgáltatókkal már kialakított hálózatok (Zágráb-Budapest és Belgrád-Budapest interfész), kiegészülve további bérelt vonalakkal<sup>3</sup>.

A modellezésben a HungaroControl úgynevezett KATIAS (MRTS adatfeldolgozási) rendszerét – melyet  $P_7$  pontként jelöltünk a radarkapcsolati elemzésben – egy elemként kezelve, annak ellenére, hogy az valójában egymással redundáns (három) feldolgozó egységekből áll: Master és annak tartalékát képező úgynevezett Slave rendszer, illetve mindkettő tartalékát biztosító RFS.

A  $P_8$  pont szintén a HungaroControl összesen négy légiforgalmi irányító munkaállomásának együttes megjelenítése. A koszovói légtérben két szektor üzemeltethető, egyenként 1-1 EC (Executive Controller) és PC (Planning Controller) pozícióval.

<sup>3</sup> lásd  $e_1$  és  $e_2$  vonalak: Jahorina radarjelek közvetlenül és a zágrábi légiforgalmi irányító központtal kialakított vonalon keresztül is beérkeznek a HungaroControlhoz)

## GRÁFELMÉLETI ALAPOK

A rendszerelmélet gyakorlati alkalmazásának egyik fontos állomása a rendszerelemek közti – sok esetben bonyolult kölcsönhatásokat is jelenthető – kapcsolatok tényének feltárása és gráfban történő ábrázolása.

Egy nagyméretű, lineáris rendszer gráf-reprezentációjának meghatározása után a gráfot jelképes értelemben „fel kell vágni” kisebb részgráfokra, majd a részgráfok egyenleteinek megoldása után az egyes részek megoldásait „össze kell kapcsolni” (ha szükséges, akár több lépésben is), ami az eredeti rendszer megoldásához vezet. A gráf egyrészt fontos állomás az eredeti, teljes rendszer egyenleteinek felállításában, másrészt a vágási eljárás megtervezéséhez nyújt segítséget [2].

A gráf olyan alakzat, amely pontokból és bizonyos pontpárokat összekötő (nem feltétlenül egyenes) vonaldarabokból áll. Matematikai megfogalmazásban a  $G(P;E;f)$  gráfon olyan alakzatot értünk, amely a  $P$  pontokból és bizonyos pontokat összekötő  $E$  vonaldarabokból áll. A  $P$  halmaz elemeit pontoknak (esetleg gráf szögpontjainak vagy csúcsainak), az  $E$  halmaz elemeit pedig a gráf éleinek nevezzük. A fenti jelölésben szereplő  $f$  függvény az  $E$  halmazt képezi le a  $P \times P$ -re, azaz bármely  $e$  élhez hozzárendel egy pontpárt a  $P$  halmaz elemei közül. Ezért az  $f$ -t szokás illeszkedési leképezésnek nevezni.

Irányított gráfról akkor beszélünk, ha az élek végpontjainak sorrendjére is tekintettel vagyunk. Irányítatlan gráf esetén a végpontok sorrendje nem releváns.

Irányítatlan gráf esetén, ha  $P_i$  és  $P_j$  csúcsokat összeköti valamely  $e_k$  él, akkor a  $P_i$  és  $P_j$  szomszédos szögpontok, és az  $e_k$  él végpontjai. Irányított gráf esetén, ha az  $e_k$  él  $P_i$ -ből  $P_j$ -be irányul, akkor  $P_i$  a kezdőpontja,  $P_j$  pedig a végpontja az  $e_k$  irányított élnek, illetve  $P_j$  szomszédja  $P_i$ -nek.

A gráf élei közti kapcsolatokat az úgynevezett csúcs- (szomszédossági-, vagy adjacencia-) mátrixszal lehet táblázatosan megadni.

Irányított gráf esetén az  $\mathbf{A}$  szomszédossági mátrix  $i$ -edik sor  $j$ -edik elemének  $a_{ij}$  értéke a  $P_i$  szögpontból induló és a  $P_j$  végpontú élek számát jelöli. Az  $\mathbf{A}$  szomszédossági mátrix  $i$ -edik hatványa megmutatja, hogy mely szögpontokból mely csúcsok érhetők el pontosan  $i$  számú lépésben, azaz élen keresztül.

Az elemek közti összetett kapcsolatokat a rendszer vizsgálati gráfjának úgynevezett elérhetőségi mátrixa is jellemzi. Egy  $m$  szögpontból álló gráf elérhetőségi mátrixán azt az  $m$  sorból és oszlopból álló  $\mathbf{D}_{m \times m}$  mátrixot értjük, ahol:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ha a } p_i \text{ csúcsból a } p_j \text{ szögpont elérhető} \\ 0, & \text{ha nem} \end{cases} \quad (1)$$

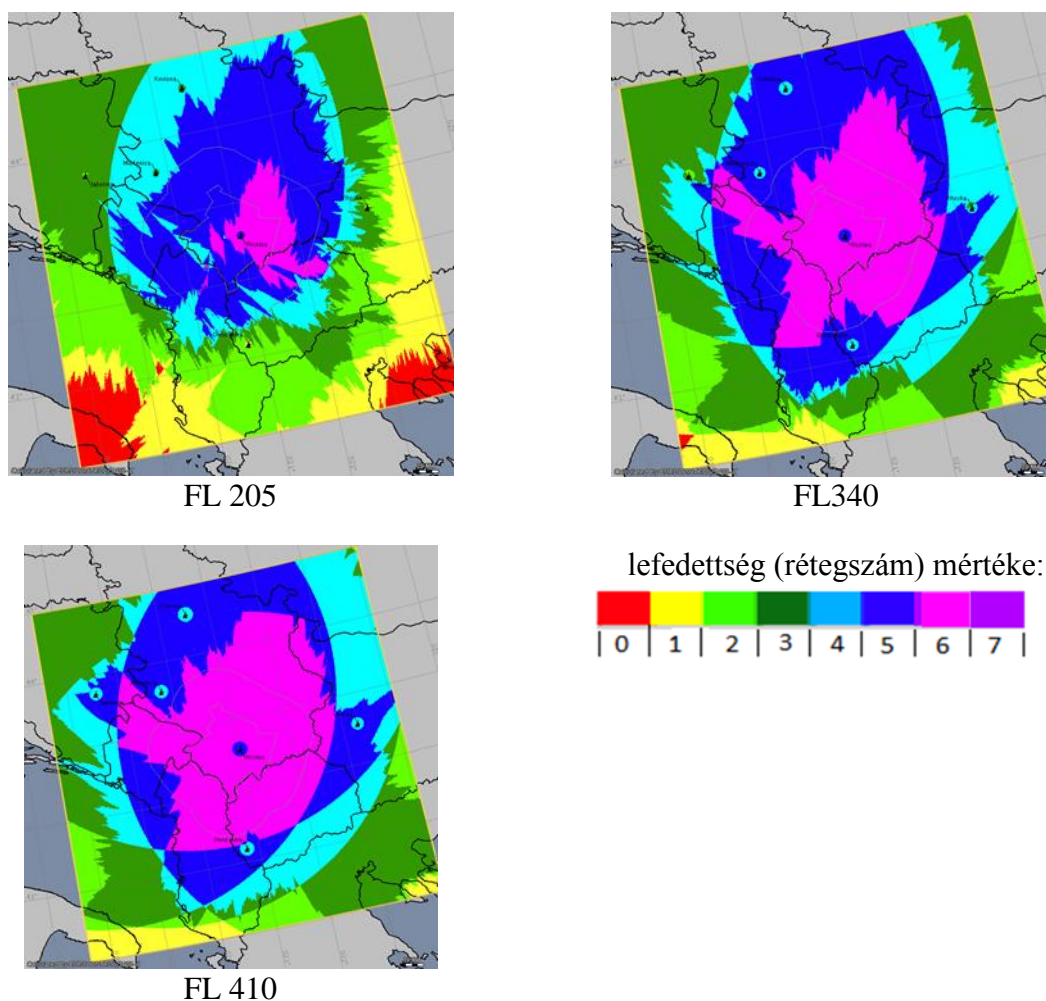
A [2] irodalom alapján könnyen belátható, hogy az elérhetőségi mátrixot a szomszédossági mátrix hatványai segítségével tudjuk felállítani (a módszer részletes leírása a könyvben olvasható).

Fontos itt megjegyeznünk, hogy jelen tanulmányban az utak különbözőségén az általuk érintett szögpontok, vagy azok sorrendjének különbözőségét értjük. Az ugyanazon szögpontokat megegyező sorrendben tartalmazó, de más élekből álló utakat azonosaknak tekintjük. Ilyen eset fordulhat elő, ha a gráfon belül két szögpontot egynél több él köt össze. Ezt az egyszerűsítő feltételt azért vezetjük be, mert végső célunk az elérhetőség vagy el nem érhetőség tényének megállapítása a tényleges utak számától függetlenül (jelen vizsgálatunk során ez különösen azért fontos, mert számunkra nem ismertek a telekommunikációs szolgáltatók hálózati útvonalai). Jelen vizsgálatunk fő célja a gráfok szögpontjai közt meglévő kapcsolatok feltárása.



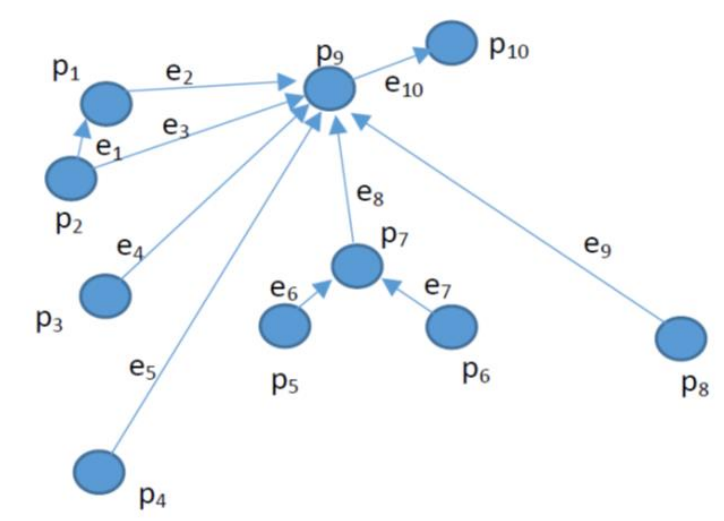
### RADARADAT KAPCSOLATI HÁLÓZATOK VIZSGÁLATA

A térség (EUROCONTROL által biztosított szoftverrel számított) abszolút radarlefedettségét a 3. ábra szemlélteti különböző repülési szintek szerint (FL205, FL340, FL410<sup>4</sup>). A cikkben a gráf-modellést a legnagyobb számú lefedettségi magasságtartományra (rétegszámra) értelmezve végeztük el (tehát azt a helyzetet elemezzük, mikor a térségben repülő azonosított légitársaságot 6 radarral detektálják).



3. ábra Radarlefedettség a koszovói térségben [13]

<sup>4</sup> Flight Level - 205-340-410 (Repülési szintek: 6200m – 10500m – 13000m)



4. ábra A radarhálózat irányított Gráf-modelleje

P1 – Zágráb ACC (HR); P2 – Jahorina radarállomás (BiH); P3 –Pristina radarállomás (KOS);  
 P4 – Ohrid radarállomás (MD); P5 – Koviona radarállomás (SRB); P6 – Murtenica radarállomás (SRB) ;  
 P7 – Belgrád ACC; P8 –Vitosha radarállomás (BG); P9 – HungaroControl adatfeldolgozó rendszer (MRTS  
 és RFS); P10 – HungaroControl légitforgalmi irányítói munkaállomások (2 EC és 2 PC pozíció);  
 e1 – e10 – adatkapcsolati hálózatok

A 4. ábrán látható irányított gráf szomszédossági mátrixa, illetve annak hatványmátrixai:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$A^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$



$$\mathbf{A}^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Mint az az (5) egyenletből látszik, a vizsgált irányított gráfban a leghosszabb ( $P_2 - P_9 - P_{10}$ ;  $P_5 - P_7 - P_{10}$  és  $P_6 - P_7 - P_{10}$ ) láncok hosszúsága 3 él. Ebben az esetben a  $\mathbf{D}$  elérhetőségi mátrixot a

$$\mathbf{D} = \text{sign} \sum_{i=1}^3 \mathbf{A}^i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

módon tudjuk meghatározni.

A gráf-modell mátrixalgebrai elemzése alátámasztja a tervezés és kivitelezés során is nagy hangsúlyt kapott szükségletet, miszerint a  $P_9$  (adatfeldolgozási) pont a folyamatban olyan kulcsszerepet játszik, aminek okán elengedhetetlen a többszörös biztosítottság kialakításra. Egy légiforgalmi szolgálat működésében bekövetkező jelentős meghibásodás kockázati

szintje elvileg igen alacsony, de mégsem zárható ki teljes mértékben. A különleges helyzetek kialakulásának egyik példája a 2012. december 7-én a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér irányító tornyában (csőtörés miatt az elektromos rendszer beázása következtében) történt meghibásodás, aminek okán a rádió-kommunikációs, informatikai és az egyéb vezérlő rendszerek működésképtelenné váltak, így a repülőtér ideiglenesen be kellett zárni [15].

A körzeti légiforgalmi szolgálat működésében esetlegesen bekövetkező vis-major helyzetet szemlélteti a térségünkben 2014. július 30-án bekövetkezett esemény, amikor a zágrábi körzeti irányító központ (Zagreb ACC – a 4. ábrán látható gráf  $P_1$  pontja) az extrém nyári időjárási körülmények kialakulása okán a heves esőzés miatti beázás és villámcsapás miatt több órára leállt, a légtér bezárásra került és a forgalmat a környező országok irányába terelték. A gyors ütemű helyreállítási munkálatok ellenére a központ csak 2 nap múlva érte el újból a teljes forgalmi kapacitási értékét [16].

Az irányító központ (egészének vagy kritikus infrastruktúra elemeinek) hirtelen leállása, illetve jelentős mértékű meghibásodása (üzemkiesése), vagy tervezett kapacitás-csökkenése hatásainak csökkentése érdekében a HungaroControl – a hálózatokat, valamint a radarokat üzemeltető szolgáltatókkal közösen – folyamatos (napi, heti rendszerességű) koordinációval tartja számon a radarállomások és vonalak működési státuszát és az egyes javítások várható idejét, időtartamát.

Az elemzés során, a térség redundáns radarlefedettsége vonatkozásában külön kiemelő annak jelentősége, hogy

- a teljes légtér vertikumára vonatkozóan különböző magasságtartományokban végzett előzetes számítások szükségesek;
- a redundancia mértékének elsődlegesen a repülésbiztonsági kockázatok kezelését kell biztosítaniuk;
- a térség útvonal-egységdíjainak meghatározását jelentősen befolyásolja a redundanciát biztosító szolgáltatói szerződések száma és azok pénzügyi tartalma;
- a redundanciát biztosító rendszerek üzemeltetési és karbantartási ütemtervét javasolt összehangolni, illetve arról előzetesen a szolgáltatást igénybe vevőt előzetesen tájékoztatni (a szerződésben vállalt kötelezettségnek megfelelően);
- az adott térségben kialakítani szükséges redundanciát nem csak másodlagos radarokkal javasolt biztosítani, honvédelmi (légtérvédelmi és légtérrendészeti) kötelezettségek fenntartása végett.

## KÖVETKEZTETÉSEK

A koszovói légiforgalmi infrastruktúra megmutatta a lehetőségét a távoli körzeti irányítói szolgáltatás szélesebb körű megvalósíthatóságának. A távoli körzeti irányítási környezet (a távoli toronyirányítási technológiához hasonlóan) is intelligens közlekedési rendszernek tekinthető, melyek célja, hogy tényleges intelligencia megtestesítése nélkül innovatív szolgáltatásokat nyújtsanak a különféle közlekedési módokhoz és a forgalomirányításhoz kapcsolódóan [17].

A fejlett alkalmazással – kiépített helyi CNS infrastruktúra, adatkapcsolati és kommunikációs hálózatokon keresztül – elvileg lehetőség nyílik a felelősségi térségtől függetlenül (a világ bármely pontjáról) biztosítható légiforgalmi szolgáltatásra, amely alapvetően megváltoztathatja az európai polgári léginavigációs és légiforgalom-szervezési viszonyokat (technológiai, üzleti, légtér- és kritikus infrastruktúra-védelmi szemszögből egyaránt).

A publikációban bemutatott módszerrel lehetőség nyílik a távoli légiforgalmi szolgáltatási módozatok előzetes elemzésére és a rendszerek, illetve hálózatok gráfokkal történő modellezésére. Az infrastruktúra kritikus elemeinek beazonosításához és a hatások kezelését célzó eljárások kialakításához a nagyméretű és komplex úgynevezett EATMN<sup>5</sup> rendszerek és kapcsolataik reprezentációjához a gráfot részgráfokkal lehet és egyben javasolt modellezni az egyes funkcióknak-témaköröknek megfelelően (például áramforrás-hálózatok és kommunikációs vonalak, radarlefedettség, levegő-föld kommunikáció, adatfeldolgozás és megjelenítés, stb.).

A részgráfok elemzése után az egyes részek eredményeit kell „összekapcsolni” (akár több lépésben is), amely végezetül a teljes rendszer elemzésének eredményéhez vezet. Kijelenthető, hogy a gráf egyfelől fontos állomás az eredeti, teljes rendszer modelljeinek felállításában, másfelől a vágási eljárás megtervezéséhez nyújt segítséget [2].

A kialakításra tervezett távoli (remote) légiforgalmi szolgáltatást biztosító infrastruktúra robusztusságának elemzéséhez segítséget nyújtó gráf-modellezést javasolt a légiforgalmi és léginavigációs rendszerek teljes spektrumára (de legalábbis azon elemekre, amelyek kritikus infrastruktúraként kerülnek beazonosításra) végrehajtani, kiegészítve az épületgépészeti és légiközlekedés-védelmi rendszerekre, elemekre vonatkozó elemzésekkel. A teljes infrastruktúra komplex gráf-modelljét az Európai Légiforgalmi Szolgáltatási Hálózat átjárhatóságáról szóló 552/2004/EK rendelet szerint javasolt felépíteni, a jogszabály szerint az ETAMN vonatkozásában meghatározott alábbi nyolc rendszernek megfelelően [18] [19] [20]:

- légtér-gazdálkodási rendszerek és eljárások;
- a légiforgalmi áramlás szervezésének rendszerei és eljárásai;
- a légiforgalmi szolgálatok rendszerei és eljárásai, különösen a repülési adatokat feldolgozó rendszerek, a légtérelőrzési adatokat feldolgozó rendszerek és az ember-gép interfészrendszerek;
- távközlési rendszerek és eljárások a földi, a fedélzet és a földi irányítás közötti, valamint a fedélzetek közötti kommunikációhoz;
- navigációs rendszerek és eljárások;
- légtérelőrző rendszerek és eljárások;
- a légiforgalmi tájékoztató szolgálatok rendszerei és eljárásai;
- a meteorológiai adatok felhasználására szolgáló rendszerek és eljárások.

Tekintettel arra, hogy a telekommunikációs szolgáltató üzleti és védelmi szempontjaira hivatkozva általában nem ismerteti a hálózati útvonalait, az előkészítés és szerződéskötés során javasolt előírni számára annak ismertetését, amely alapján a komplex és mindenre kiterjedő gráf-elemzéshez a hálózati réteg elemzése is szükségszerű. A távoli körzeti légiforgalmi irányítási infrastruktúra robusztusságának meghatározásában fontos elemet játszanak a kommunikációs és adathálózatok is, mint kritikus infrastruktúra elemeivel kapcsolatos kockázatok és követelmények feltérképezése is. [14]

A szolgáltatói szerződéseket javasolt több szolgáltatóval is megkötni, és a hálózati útvonalak bemutatása mellett feltételként megszabni, hogy legyen mikrohullámú<sup>6</sup> és földfelszín<sup>7</sup> alatti hálózat rendelkezésre állása. Az egyre inkább elterjedő IP alapú vonalak alkalmazásakor a 256 bites titkosítást javasolt minimum elvárásként meghatározni az ATM iparágban is egyre nagyobb jelentőséggel bíró kiberbiztonság (Cyber Security) érdekében.

---

<sup>5</sup> European ATM Network

<sup>6</sup> kockázati szempont: időjárási sérülékenység

<sup>7</sup> kockázati szempont: mechanikai behatás veszélye

A teljes függetlenség szavatolása érdekében, a hálózatokat biztosító szolgáltatók számára javasolt előírni, hogy nem bérelhetnek vonalakat egymástól (ez különösen fontos abban az esetben, ha nem ismertek a szolgáltatók hálózati útvonalai). Az IP alapú adattovábbítási technológia alkalmazása esetében a szerződésekben a szolgáltatás kiesésének kockázatát is kezelni kell. A rendszerbiztonság szempontjából kiemelt jelentőséggel bír, hogy a hálózat minden eleme (áramforrás, nyomvonal, berendezések) rendelkezzen redundanciával.

A teljes értékű modellezés érdekében további elemzés javasolt a HungaroControl úgynevezett KATIAS (MRTS<sup>8</sup> adatfeldolgozási) rendszere vonatkozásában – melyet  $P_7$  pontként jelöltünk az elemzésben – mert az valójában egymással redundáns (három) feldolgozó egységekből áll: Master és annak tartalékát képező úgynevezett Slave rendszer, illetve mindkettő tartalékát biztosító RFS<sup>9</sup>.

A (remote) irányítási technológia megvalósíthatóságának megállapításához szintén vizsgálandó a fent említett adatfeldolgozási rendszer, valamint a légiforgalmi irányító munkaállomások kapcsolata. Ez a gráf-modellben szereplő p8 pont, amely a HungaroControl műveleti termében összesen négy pozíciót jelent (a koszovói légtérben két szektor<sup>10</sup> üzemeltethető, egyenként 1-1 EC (Executive Controller) és PC (Planning Controller) pozícióval).

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KORN, G.A. - KORN, T.M, Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, Courier Dover Publications, 1975.
- [2] POKORÁDI L.: Rendszerek és folyamatok modellezése. Campus Kiadó Debrecen 2008. ISBN 978-963-9822-06-1
- [3] POKORÁDI L.: Rendszerek és folyamatok gráfelméleti vizsgálata, Tudományos Kiképzési Közlemények, MH. SzRTF, Szolnok 1993/2-3, p. 33–44.
- [4] POKORÁDI L.: Rendszerek gráfmodellezése. GÉP LIX. 8) pp. 59-62. (2008)
- [5] CSISZÉR T.: A hálózatok kutatás alkalmazása a folyamatalapú minőségfejlesztésben, Minőség és megbízhatóság, 2011/5, pp. 274-282.
- [6] CSISZÉR T.: A kockázati események közötti összefüggések vizsgálata hálózatelemzése, Magyar Minőség 2011/11, pp. 59-61.
- [7] ZENTAI D.: Gráfelméleti módszerek a kritikus infrastruktúra védelemben, Hadmérnök, XII. Évfolyam 2. pp. 341-347.
- [8] ENSZ 1244 (1999) számú határozat. Forrás: <http://epa.oszk.hu/00000/00036/00070/pdf/100-109.pdf> (letöltve: 2016.01.10.)
- [9] HungaroControl: A NATO/KFOR ismét megnyitotta a Koszovó feletti magas légtérrel a polgári átrepülő légi forgalom előtt. Forrás: <http://www.hungarocontrol.hu/sajtoszoba/hirek/koszovo-magas-legter> (letöltve: 2016.01.04.)

---

<sup>8</sup> Multi Radar Tracking System

<sup>9</sup> Radar Fallback Service

<sup>10</sup> FL205-FL365 és FL365-660 a szektorok magassági tartománya

- [10] MTI: Budapestről irányítják Koszovó magas légtérét. Forrás: <http://www.hirado.hu/2014/06/12/budapestrol-iranyitjak-koszovo-magas-legteret/> (letöltve: 2016.06.12.)
- [11] KREUZ M. – SHULTZ M.: Modelling Interactions in Complex Systems – An Air Navigation Service Provider Focussed Approach. 4th SESAR Innovation Days (2014.11.25-27.)
- [12] HungaroControl forgalmi statisztika (vállalati adatforrás)
- [13] HungaroControl: Éves jelentés 2015. Forrás: <http://www.hungarocontrol.hu/download/5b01b0d52ceb14bfa39f401d7beadc31.pdf> (letöltve: 2017. 01.10.)
- [14] FELLER T. – HÍDVÉGI G. – KÖLLER L.: A nemzetgazdaság és nemzetbiztonság által igényelt „kritikus infrastruktúra” hálózatok komplex szemléletű vizsgálata (Magyar Mérnöki Kamara Közlekedési Tagozat tanulmány). Budapest 2010. november
- [15] AIRportal.hu: Ferihegy Tower blackout: Bezárták a repülőteret. Forrás: <http://www.airportal.hu/ap/viewtopic.php?t=10877> (letöltve: 2016.01.08.)
- [16] Network Manager: Monthly Network Operations Report. Analysis – July 2014. Forrás: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/performance/201407/network-operations-report-july-2014-analysis.pdf> (letöltve: 2017.02.01.)
- [17] MARKOVITS-SOMOGYI R.: Intelligens közlekedési rendszerek a légiforgalmi irányításban. Repüléstudományi Közlemények 2015/3
- [18] 552/2004/EK rendelet az Európai Légiforgalmi Szolgáltatási Hálózat átjárhatóságáról
- [19] 68/2011. (XI. 30.) NFM rendelet a léginavigációs és a légiközlekedés biztonságát szolgáló egyéb földi berendezések engedélyezési eljárásáról és hatósági felügyeletéről
- [20] 633/2007/EK rendelet az előzetes tájékoztatás, a koordinálás és a légi járatok légiforgalmi irányító egységek közötti átadása céljára szolgáló légiforgalmi üzenetovábbítási protokoll használatára vonatkozó követelmények megállapításáról