

Bera József<sup>1</sup> – Pokorádi László<sup>2</sup>

## REPÜLÉSI ZAJ KEZELÉSÉNEK BIZONYTALANSÁGA<sup>3</sup>

*Napjainkban a helikopteres repülés terjedésével a leszállóhelyek jelenős környezetvédelmi problémát jelenthetnek. A környezeti kockázatok vizsgálata és a környezethasználatok értékelése mindinkább túlmutat a határértékek előírásán alapuló minősítésen. Ezért vizsgálataink középpontjába került azon módszerek keresése, ami az időben változó környezeti állapot és a kialakuló hatások kockázatait veszi figyelembe, az elért eredményeket a műszaki környezetvédelemben szeretnénk felhasználni. Tanulmányunkban egy Monte-Carlo szimulációs elemzési módszert mutatunk be heliport zajkibocsátásának előrejelzésére, illetve bizonytalanságának elemzésére.*

### UNCERTAINTY OF AVIATION NOISE MANAGEMENT

*Nowadays, by spread of the helicopter flight heliports have become major environmental problem. The examination of environmental risks and the evaluation of environmental usages are increasingly have some significance beyond the assessment based on the prescription of limiting value. Therefore, searching for methods that take into consideration the environmental condition changing in time and risks of developing influences have become the centre of our researches. This paper shows a Monte-Carlo simulation analysis method that can be used to prognosticate the noise emission of heliports and to analyze its uncertainty.*

## 1. BEVEZETÉS

A repülőtér és a működéséhez kapcsolt légi forgalom egy olyan rendszert alkot, amit mindaddig, amíg a repülési tevékenységet vizsgáljuk, viszonylagos pontossággal tudunk meghatározni. A repülési tevékenységekkel összefüggő környezethasználatok esetében a hatáselemzésben fennálló bizonytalanság miatt azonban a környezetvédelmi rendszer meghatározása és értelmezése, majd további elemzése célszerűbb, hogy a beavatkozások helye, módja és időpontja, valamint a környezetterhelés közötti összefüggés is kezelhető legyen [1]. Amikor a környezetvédelmi rendszerünket felépítjük, látni kell, hogy a probléma és a bizonytalanság akkor kezdődik, amikor a környezeti hatások miatti rendszerhatárok változnak, vagyis a környezetből érkező, értékükben és időben is változó jelek hatására elveszik az egyértelmű rendszerhatár. Hogyan lehet kezelni a rendszerhatárból eredő bizonytalanságot?

Mindig törekedni kell arra, hogy a megfelelő és a kellő pontosságú adatot használjuk fel a rendszerhatárok meghatározásához, mivel ezek hiánya modell bizonytalanságokat, torz következtetéseket eredményez, vagy eredményezhet [6]. Rögzíteni kell ugyanakkor, hogy milyen szempontból határozzuk meg a környezetvédelmi követelményeket, valamint az értékelési szintek mekkora szerepet kapnak az értékelésben, mit tekintünk védendőnek a környezeti hatással szemben. Nem lehetséges a rendszerhatár kijelölése annak megismerése nélkül, hogy az előírt

<sup>1</sup> környezetvédelmi szakértő, berajo@kabelnet.hu

<sup>2</sup> egyetemi tanár, Debreceni Egyetem, pokoradi.laszlo@prosysmod.hu

<sup>3</sup> Lektorálta: Prof. Dr. Szabolcsi Róbert okl. mk. ezds; egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő Tanszék, szabolcsi.robort@uni-nke.hu

határértékeknek hol, milyen területen és milyen időpontban kell teljesülni, de figyelni kell arra is, hogy lokális vagy összefüggéseiben nagyobb kiterjedésű hatásról beszélünk-e, illetve mekkora és milyen jellegű a környezet állapotában bekövetkező változás mértéke.

Ezek a szempontok meghatározóak a repülési zaj kezelésében egy repülőtér, vagy egy kisebb leszállóhely esetében is, ami további kérdéseket vet fel, ha eleve a repülési tevékenység, például a ki- vagy berepülési útvonal változtatásáról beszélünk, ami egy-egy terület érintettségét változtatja meg hosszabb-rövidebb időszakokban. A repülési zaj kezelése a bizonytalanságból eredően így nehezen kezelhető, és állandó vitás helyzetet eredményez a környezethasználó és a védelmet igénylő – ami magába foglalja a lakosságot, a természeti érték védelmét – között. Ennek feloldására keressük a választ, amikor a tanulmányunkban a repülési zaj kezelése és a bizonytalanság kapta a központi szerepet.

## 2. KÖRNYEZETVÉDELMI RENDSZER ÉS KÖRNYEZET BIZONYTALANSÁGA

A környezet védelme túlmutat az ember védelmén, a fogalomkör értelmezését szélesebb vertikumban kell megtennünk [2]. A természeti értékek megóvásáról is gondoskodni kell, a humán környezet számára is fontos a természetes környezet kedvező állapotának fenntartása. Ennek eléréséhez nem elégségesek azok az intézkedések, melyek pusztán szabályozást vagy korlátozást jelentenek, egy modern társadalom a gazdasági érdekeket tekintve nehezen tesz eleget az ilyen jellegű elvárásoknak. Ez okozza, hogy a műszaki környezetvédelem eszközei kerülnek előtérbe, ami ugyanakkor feltételezi egy adott környezetvédelmi probléma pontos leírását mérési és tervezési adatokkal. Mindez elképzelhetetlen a környezetvédelmi rendszer megismerése és a rendszerbizonytalanság helyes kezelése nélkül.

A repülési tevékenység, így a repterek üzemeltetése és a légi közlekedés minden esetben összetett rendszert alkot, több irányú és egymástól független, ugyanakkor egymással mégis összefüggésben lévő hatással. A környezetben generált válaszok és reakciók emiatt változó jellegűek mutatnak. Mindkét eset fő jellemzője az időben eltérő hatásmechanizmus, ami a rendszer és környezete kapcsolódási pontjait, illetve a rendszerhatárokat is módosítja. Ennek kezelésére a vizsgálataink során az adott problémát, mint környezetvédelmi rendszert vizsgáljuk, melynek elemeit a különböző környezeti hatások alkotják. Ezek az elemek külön-külön is szerepet kapnak a környezetvédelmi rendszer megítélésében és a rendszerhatárok kialakulásban, későbbi változásaiban. Azonban a rendszer elemei közötti összefüggések is jelentőséggel bírnak, amit a repülésben szeretnénk nagyobb hangsúllyal kezelni [4].

A repülési zaj kezelésével kapcsolatos kérdésekre azon a módon szeretnénk megfelelő választ kapni, hogy a környezeti hatás bizonytalanságát elemezzük a továbbiakban, ezen belül természetesen a kibocsátások és a környezeti jellemzők közötti kapcsolatot is figyelembe vesszük. Vizsgálatunk során ugyanakkor nem térünk ki a hatásterület kérdésére, mert egy-egy érintett terület lehatárolásával még nem kapunk megfelelő információt a kialakuló hatás minősítéséhez és a következtetésként szükséges, a valós környezetvédelmet adó műszaki beavatkozáshoz.

A vizsgálat középpontjába az eddig elmondottak alapján a repülést, mint egy lehatárolt környezetvédelmi rendszert helyeztük, ezzel együtt kijelölve azokat a sarokpontokat, melyek segítséget adnak a rendszerbizonytalanság áttekintéséhez, valamint a rendszerbizonytalanság és a rendszerelemek közötti változások összefüggéseinek megismeréséhez.

### 3. HELIKOPTER LESZÁLLÓHELYEK ZAJKIBOCSÁTÁSÁNAK KÖRNYEZETVÉDELMI KÉRDÉSEI

A helikopter leszállóhelyek működtetésével szemben megfogalmazott igények miatt a lakóterületek mellett természetvédelmi területek közelében is egyre gyakrabban kerül sor olyan repülési műveletekre, melyek időszakosan jelentős zajterhelést okoznak. Emiatt épített környezetben a helikopter leszállóhely létesítés és működtetéssel, természetes környezetben az átrepülések végrehajtásával összefüggésben minden napos feladattá vált a repülési zaj kezelése. Leszállóhelyek működtetésében azonban korlátozás, hogy ezek a létesítmények a legtöbbször olyan környezetben találhatóak, vagy a repült légtér olyan területet is érint, ahol a repülési zaj elleni védelmet csak nehezen, a repülés tiltásával lehet biztosítani. Elsődleges környezetvédelmi kérdés tehát a rendszerhatár kijelölése, valamint a rendszerkörnyezet válaszreakcióinak megismerése, hiszen egy-egy repülési feladat több, egymástól jelentősen eltérő tulajdonságokkal bíró környezetet is érinthet. Ezek az eltérések a repüléssel szemben meghatározott követelményrendszert is befolyásolják, ami a rendszer egészét és a repülés miatt fellépő zajterhelést tekintve bizonytalanságot okoz.

Ezt a bizonytalansági tényezőt egyszerűbb esetben – és a napjainkban alkalmazott módszereket tekintve – úgy kezeljük, hogy zajvédelmi szempontból a repülési műveleteket, vagy a műveletszámot korlátozzuk, de hasonló okokból kerülhet sor a leszállási és kirepülési útvonalak pontos kijelölésére is azzal, hogy az útvonaltól való eltérés nincs megengedve. Tapasztalatunk szerint – eddigi vizsgálati eredményeink erre mutatnak rá – az ilyen zajvédelmi követelmény-rendszer teljesítése nagyfokú fegyelmezettséget feltételez a repülés résztvevőtől. Ez a feltétel ugyanakkor a repülés egyéb meghatározó szempontjai – biztonság, üzemeltetési előírások és műszaki feltételek, repüléstechnikai feltételek – elé helyezi a zajvédelmet. Mielőtt kísérletet tennénk a repülés és a környezeti zajvédelem közötti ellentét feloldására, vizsgáljuk meg az eddigiekben tárgyalt problémakört és elemezzük a repülési zaj kezelésében rejlő bizonytalanságot. Ennek első lépése a repüléstől származó zajterhelés meghatározása, de az egyszerűnek tűnő feladatban tapasztalatunk szerint nem csak a zajterhelés adat és az eredmény értékelése generál vitát, hanem a zajterhelés-változás mértéke is. Ez véleményünk szerint a repülési eljárásokkal és módzatokkal, valamint legfőképp az abban lévő bizonytalansággal van összefüggésben.

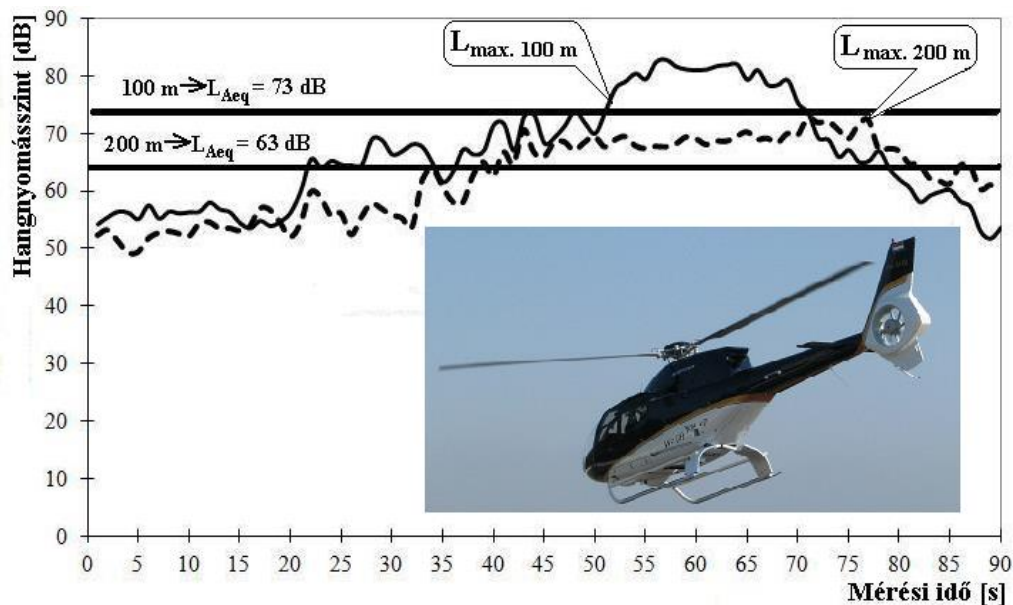
Helikopter leszállóhely környezeti hatását a zajterheléssel azonosítjuk. Egyéb hatással, jelentős levegőterheléssel, talaj- és vízszennyezéssel, vagy hulladékok keletkezésével a legtöbb esetben nem számolunk szokásos üzemeltetés idején. Ennek oka, hogy ezek a hatások sok esetben inkább pozitív eredményt adnak, vagy a hatás mértékét nem minősítjük jelentősnek [3]. Marad a zaj, ami ugyanakkor állandósult problémát jelent, mikor a repülésről beszélünk. Nem csoda, hogy a kezelésére elterjedt megoldással kapcsolatban is több kérdés fogalmazódik meg. Első és meghatározó kérdés a zajterhelés értékeléséhez alkalmazott vizsgálati eljárással függ össze. A

repülési zajterhelést az alábbi egyenlettel határozzuk meg a jelenleg alkalmazott előírásokat követve, [5] alapján:

$$L_{AM, re} = 10 \cdot \lg \frac{\tau_{ref}}{T_M} \cdot M \cdot 10^{0,1 L'_{AX}} [\text{dB}] \quad (1)$$

ahol:

- $L_{AM, re}$  – repülésből származó mértékadó A-hangnyomásszint [dB];
- $\tau_{ref}$  – 1 s;
- $T_M$  – megítélési idő [s];
- $M$  – mértékadó repülési műveletek száma;
- $L'_{AX}$  – átlagos repülési zajesemény szint [dB].



1. ábra Helikopter átrepülés hangnyomásszint-idő függvény (a Szerzők saját mérése és fotója)

Az (1) egyenlet alkalmazása jelenleg Magyarországon, az Európai Unió és a világ számos országában is elterjedt. A módszer lényege, hogy a helikoptertől származó tényleges  $L_{AX}$  zajszint mellett figyelembe veszi a repülési műveletek számát, valamint hosszabb, 8 óra vagy 16 óra megítélési időre vonatkozik a végeredmény. A számítás eredménye ugyanakkor egy átlagos érték, ami olyan zajterhelést ad, ami a legtöbb esetben jelentősen eltér az repülésekkel összefüggő, rövidebb idő alatt fellépő egyedi zajesemény szint értékektől. A két érték közötti különbséget szemléltetjük az 1. ábrán. A bemutatott vizsgálati eredmény egy fix terhelési pont felett 100 m-en, majd 200 m-en történt átrepülés zajszint-idő függvénye.

Az 1. ábra alapján látható, hogy rövid átlagolási idő esetén is megmutatkozik az egyenértékű zajszintek és a legnagyobb zajszintek közötti különbség. Esetünkben ez egy rövidebb időszakban látható, mert a távolodó helikopter miatt növekszik az észlelési távolság. Mi a probléma?

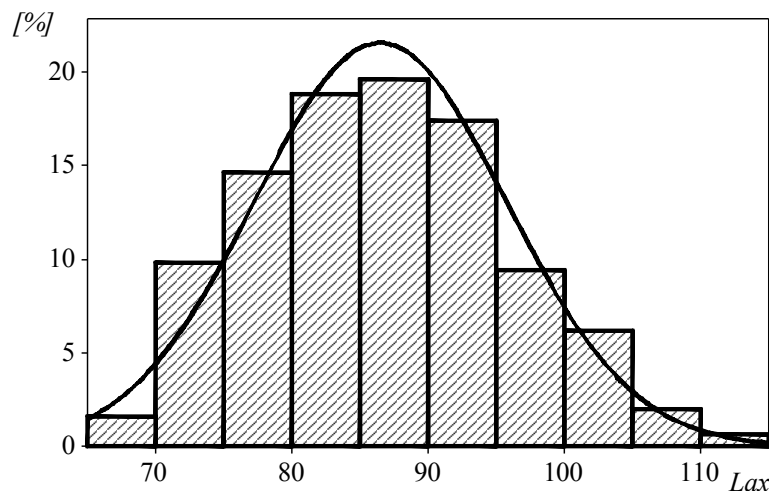
Amíg a leszállóhely zajvédelmi értékelése (1) összefüggés alkalmazásával csak az egyenértékű zajszint érték alapján történik, az esetleges beavatkozás, így a repülési magasság, a repülési módozat megváltozása, vagy a repülési események számának növekedése és csökkenése nehezen értékelhető a várható hatás szempontjából. Az előírt határértékhez – például nappal 65 dB

– viszont egy olyan átlagos zajterhelés értéket hasonlítunk, amit a zajeseményszint érték mellett a műveletszám is jelentősen befolyásol. Kérdés: a műveletszám eseti növelése milyen mértéket érhet el egy korábbi értékhez képest, és az esetleges határérték túllépést ebben az esetben hogyan ítéljük meg?

A kérdés jelentőségét támasztja alá, hogy a fel- és leszállásokra nem folyamatosan, hanem szakaszosan, esetenként nagyobb forgalmi szünetekkel kerül sor egy leszállóhelyen. Tehát lehetséges olyan időszak egy repülési nap, amikor a kisszámú repülések miatt a más napokon kialakuló határérték túllépés mértéke és időtartama nem okoz problémát az észlelés szempontjából, mivel többször is van repülés nélküli időszak, amikor nincs fel- és leszállás és ebből eredő zajterhelés. Tehát a továbbiakban célszerűen vizsgáljuk azt a lehetőséget, hogy a műveletszám megváltozásával egy-egy érintett terület felett, illetve egy átrepülési útvonalon milyen zajszint növekedés következik be, és ebben az esetben mekkora a határérték túllépés valószínűsége? A kérdésre keressük a választ a továbbiakban.

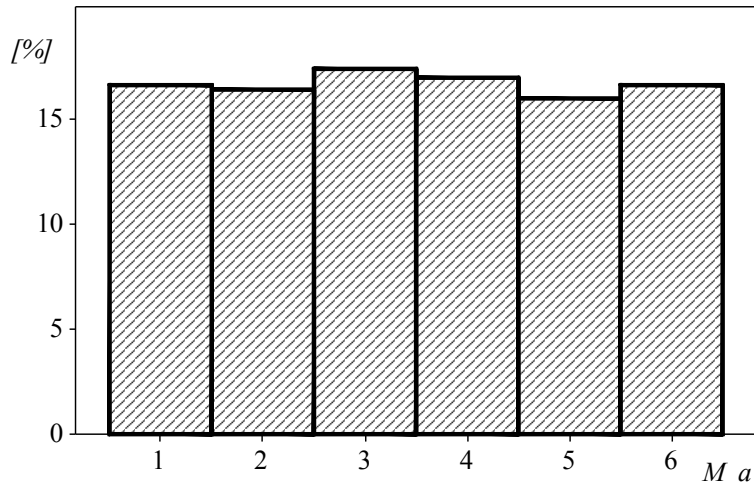
#### 4. HELIKOPTER LESZÁLLÓHELY ZAJKIBOCSÁTÁSÁNAK MONTE-CARLO SZIMULÁCIÓJA

Az (1) egyenletünk lesz a Monte-Carlo szimuláció – mely módszer részletesen a [7] irodalomból ismerhető meg – során alkalmazott determinisztikus modell, amit a meghatározott kritériumok alapján meghatározott, véletlenszerűen kiválasztott  $M$  művelet szám, és  $L'_{AX}$  átlagos repülési zajeseményszint értékekkel gerjesztünk. A várható eltérések becslése érdekében a szimulációt elvégeztünk az átlagos napi „*alap*”, majd a tervezett rendezvény során várható „*esemény*” repülési műveletszámra.

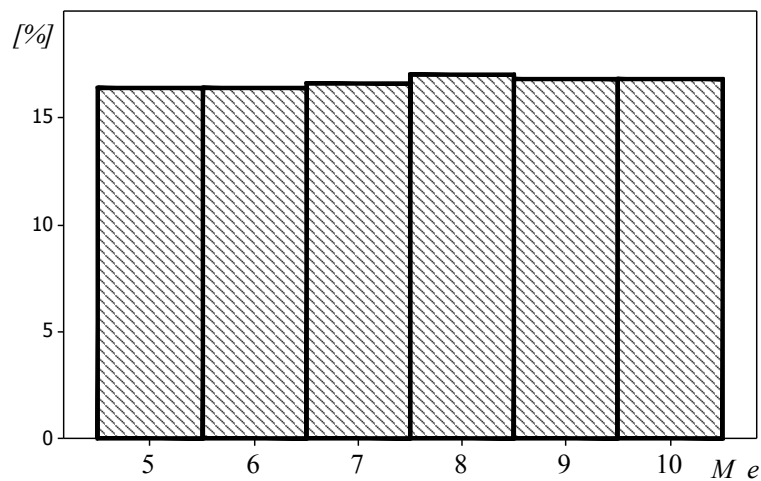


2. ábra Az átlagos repülési zajeseményszint ( $L'_{AX-gerj}$ ) hisztogram

Mindkét esetre ugyanazon átlagos repülési zajeseményszint gerjesztési értékeket alkalmaztunk, mivel a helikopterek típusai, terhelései várhatólag jelentős mértékben nem fognak eltérni a normál napi „*alap*” esetektől. A szimulációk során alkalmazott gerjesztési hisztogramjaikat a 2–4. ábrák szemléltetik.



3. ábra „Alap” repülési műveletszám hisztogram



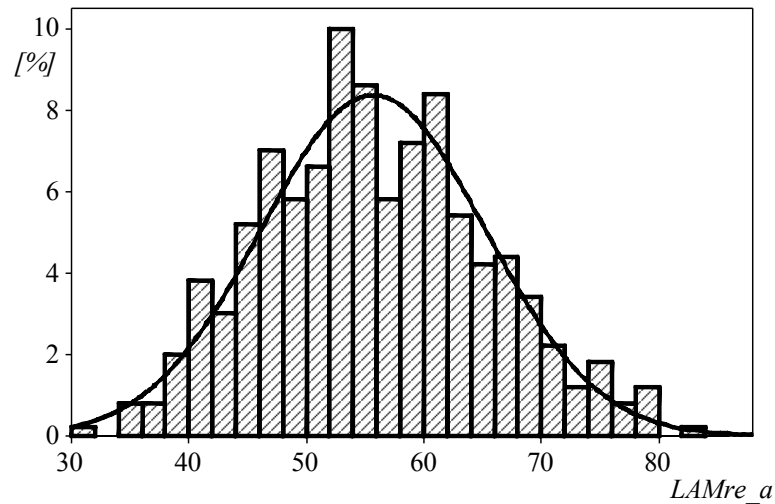
4. ábra „Esemény” repülési műveletszám hisztogram

	Minimum	Átlag	Maximum	Szórás
$M_{alap}$	1	3,492	6	1,7017
$L_{AM, re - alap}$ [dB]	44,900	55,690	83,700	9,533
$M_{esemény}$	5	7,518	10	1,7063
$L_{AM, re - esemény}$ [dB]	39,900	59,570	86,200	9,267

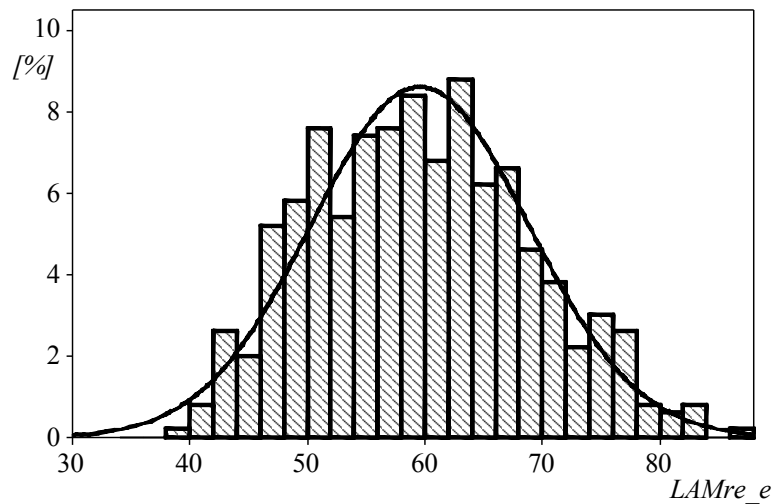
1. Táblázat A szimuláció adatainak statisztikai elemzése

A két szimuláció eredményeinek hisztogramjait az 5. illetve a 6. ábrák szemléltetik, főbb statisztikai adataik az 1. táblázatban találhatóak meg.

A grafikonokat szemlélve megállapítható, hogy bár az átlagos műveleti szám az „alap”-hoz képest jelentősen növekedett, az átlagos megítélési zajterhelés csak kis mértékben emelkedett. Ez megfelel az akusztikában alkalmazott logaritmusos számítási eljárás logikájának, a „tíz meg tíz az tizenhárom” szabálynak. A részletesebb szakmai következtetések túlmutatnak jelen tanulmányunkon. Viszont általánosságban kijelenthető, hogy egy nagymértékű forgalomváltozás esetén kialakulhat olyan kisebb zajszint változás, mely nem ad megfelelő szám adatot a hatás megítéléséhez, vagy a tervezéshez.



5. ábra „Alap” repülési zajterhelés hisztogram



6. ábra „Esemény” repülési zajterhelés hisztogram

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK, AJÁNLÁSOK

A várható hatások körében a kockázatkezelésnek és a bizonytalanságnak növekvő szerepet tulajdonítunk, mivel jelentőségét igazoltnak látjuk egy-egy beavatkozás esetében a várható hatások elemzése mellett az extrém helyzetek kezelésében is. Az extrém helyzetek kezelése nem lehetséges a valós helyzet, valamint az ebből eredő, időben jelentkező, különböző jellegű és mértékű környezeti hatások teljes megismerése nélkül. Ezek az extrém helyzetek lehetnek a szokásostól eltérő üzemi állapotok, előfordulhat tartós vagy állandósult környezetszennyezés, környezetkárosítással járó üzemi állapot vagy baleset is.

A repülőtér működtetése és a légi közlekedés környezetvédelmi jellegű kockázati tényezői szoros összefüggésben vannak a rendszer és rendszer-környezet kapcsolattal, ami kockázat és egyben bizonytalanság, emiatt ezek a folyamatok a kockázatbecslés eszközeivel szabályozhatók. Kutatási tapasztalataink szerint a Monte Carlo szimuláció felhasználható egy determinisztikus

modell parametrikus bizonytalansági elemzéséhez, mert egy adott pont körüli lehetséges értékek valószínűségi eloszlását adja meg, ami alkalmas adott helyzetben a vizsgált légi forgalomtól származó zajterhelés bizonytalanságának elemzésére. A kutatási eredmény rámutat arra, hogy az egyszámos terhelési adatok kiegészítése a bizonytalanság kezelésével összefüggő adatokkal segítséget nyújt ahhoz, hogy a tevékenységben szükséges vagy egyéb szempontból bekövetkező beavatkozások a várható környezeti hatás oldaláról is kezelhetőek legyenek.

A repülés számára is fontos szempont, hogy azok a feltételek, melyek a környezetvédelmi rendszerhatár, illetve a környezet válaszreakciója miatt előírásra kerültek, a későbbiekben ne változzanak meg a rendszeroldalon bekövetkező változások miatt, ezzel okozva a repülés korlátozását vagy ellehetetlenülését. Egy ilyen problémára való felkészülést segíti, ha már előre meghatározzuk a lehetséges zajterhelés értékek valószínűségi eloszlását, vizsgáljuk a szélső értéket. Ezzel a leszállóhelyek és a repülési útvonalak környezetében található épületek tervezéséhez is több adat áll rendelkezésre, javul a környezethasználó és a védelmet igénylő közötti összhang, együttműködés. További célkitűzés lehet, hogy a zajesemény-szint gerjesztési értékek és a várható hatások közötti összefüggés követhető legyen, azaz a rendszeroldalon bekövetkező változásokkal, például az átrepülések száma vagy a repülési módozat változásaival a rendszer környezetben várható reakciókat is vizsgáljuk és megismerjük.

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bera József – Pokorádi László: Helikopterzaj elmélete és gyakorlata, Campus Kiadó, Debrecen, 2010. 192 o.
- [2] Bera József – Pokorádi László: Légi forgalom és repülőtér fejlesztés környezetvédelmi kockázatkezelése, Közlekedéstudományi Konferencia 2012 Győr (ISBN: 978-963-9819-84-9) p. 137-148.
- [3] Bera József – Pokorádi László: Environmental Risk Management of Air-Transport, Acta Technica Jaurinensis, Győr, 2012., 245-252. oldal.
- [4] Bera József – Pokorádi László: Műszaki környezetvédelem és a kockázatkezelés összefüggései, Műszaki Tudományos Füzetek, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XVIII., Erdélyi Múzeum-Egyesület kiadványa, Kolozsvár, 2013. március 21-22. (megjelenés alatt).
- [5] Pokorádi László – Bera József: Helikopter leszállóhely zajkibocsátásának Monte-Carlo szimulációja, Műszaki Tudományos Füzetek, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XVIII., Erdélyi Múzeum-Egyesület kiadványa, Kolozsvár, 2013. március 21-22. (megjelenés alatt).
- [6] Pokorádi László.: Rendszerek és folyamatok modellezése, Campus Kiadó, Debrecen, 2008, 242 oldal.
- [7] Pokorádi László – Molnár Boglárka: Monte-Carlo szimulációs valószínűségi bizonytalanságelemzés szemléltetése, Repüléstudományi Közlemények 2010. április 16. pp.12, [http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2010\\_cikkek/Pokoradi\\_L-Molnar\\_B.pdf](http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2010_cikkek/Pokoradi_L-Molnar_B.pdf) (2013. 03 10.).