

Monte-Carlo Szimuláció alkalmazása a légi közlekedés környezeti hatásainak elemzésére

Bera József*, Pokorádi László**

*Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, 1081 Budapest Népszínház u. 8.
(e-mail: bera.jozsef@prosysmod.hu).

** Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 1081 Budapest Népszínház u. 8.
(e-mail: pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu)

Abstract: Ahogy az emberi tevékenységek többsége, úgy a légi közlekedés is összetett, időben változó hatást gyakorol környezetére, ezért a környezet részéről adott válaszreakciók minden esetben változó jellegű mutatnak. A környezeti válaszreakciók fő jellemzője a bizonytalan hatásmechanizmus, valamint a nem állandósult, instacioner állapot. Mivel a környezeti állapotjellemzők a forráshoz hasonlóan befolyásolják a kialakuló terhelés mértékét, jellegét és sokszor az időtartamát, a környezet igénybevételével járó tevékenység és a hozzá tartozó környezet kapcsolódási pontjai is bizonytalanok, a környezet is hatással van a kialakuló terhelésre, azon keresztül pedig a kibocsátó forrásra. 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 bizonytalanságait veszi figyelembe. Tanulmányunkban egy Monte-Carlo szimulációs elemzési módszert mutatunk be a légiközlekedés zajkibocsátásának előrejelzésére, illetve bizonytalanságának elemzésére.

1. BEVEZETÉS

A légi közlekedés jellemzőit és sajátosságait tekintve olyan rendszert alkot, melyből eredő és vele összefüggő környezeti igénybevétel csak viszonylagos pontossággal tudunk meghatározni. A repülési tevékenységektől származó környezethasználatok esetében a hatáselemzésben fennálló bizonytalanság miatt a környezetvédelmi rendszer meghatározása, majd további elemzése célszerű ahhoz, hogy a beavatkozások helye, módja és időpontja, valamint a környezetterhelés közötti összefüggés is kezelhető legyen (Bera József, Pokorádi László; 2010).

Környezetvédelmi rendszeren a kölcsönös összefüggés alapján kapcsolatban lévő rendszerelemek és folyamatok által generált környezeti állapottevényezők összességét értjük. A környezetvédelmi rendszerhatárt pedig, mint a környezetvédelmi rendszer állapottevényezőkkel kijelölt sarokpontjaihoz kötött burkolófelületet definiáljuk.

Könnyen belátható, hogy a környezetvédelmi elemzések során egy többváltozós rendszert kell kezelni, melyben, a legtöbb esetben a tervezett és felügyelet mellett zajló tudatos behatáson túl számolni kell véletlen és járulékos behatásokkal is. Ezek tovább erősítik a környezetvédelmi rendszer instacioner jellegét, azaz a nem állandósult jellemzőt, ami arra irányítja rá a figyelmet, hogy a rendszerhatárok nem adhatók meg egyszámos határértékekkel, a rendszer sarokpontjai mentén kialakuló burkoló felület a bekövetkezési valószínűségekkel lesz kezelhető.

Törekednünk 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 (Pokorádi László; 2008). Rögzíteni kell, 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 határértékeknek hol, milyen területen és milyen időpontban kell teljesülniük. Figyelünk kell arra is, hogy lokális vagy összefüggéseiben nagyobb kiterjedésű hatásról beszélünk-e, illetve mekkora és milyen jellegű a környezet állapotában bekövetkező változás mértéke.

A repülés környezeti hatásainak kezelése a bizonytalanságból eredően nehezen oldható meg, és állandó vitás helyzetet eredményez a környezethasználók és a védelmet igénylők között. Ennek a kérdésnek a felvetése nem újkeletű. Sobor Ákos, szerzőtársaival, már korábban felvetette a sugárhajtóműves utaszállító repülőgépek zajszint alakulásának és meghatározásának bizonytalanságát (Sobor Ákos et al.; 1982). Tanulmányukban valószínűség-számítási elemzés segítségével bemutatták, hogy az egyenértékű zajhatás változása, valamely pontban, annak időbeni lefolyásától – az útvonalától való távolság függvényében –, valamint az útvonal szórásától függ, de független az eloszlás típusától.

Az előzőekben vázolt probléma feloldására keressük a választ, amikor a tanulmányunkban a repülési zaj kezelése és a bizonytalanság kapta a központi szerepet.

Jelen elemzésünk során alkalmazott Monte-Carlo szimuláció egy olyan matematikai eszköz, amely determinisztikus véletlen események sorozatával megoldására alkalmas. Más megfogalmazásban, Monte-Carlo szimuláción a sztochasztikus szimulációs módszerek összességét értjük (Pokorádi László, Molnár Boglárka; 2013). A módszert széles körben alkalmazzák különböző események lehetséges kimeneteleinek és azok valószínűségeinek szimulációjára.

Tanulmányunk célja egy Monte-Carlo szimulációs elemzési módszer kidolgozása a légiközlekedés zajkibocsátásának előrejelzésére, illetve bizonytalanságának elemzésére.

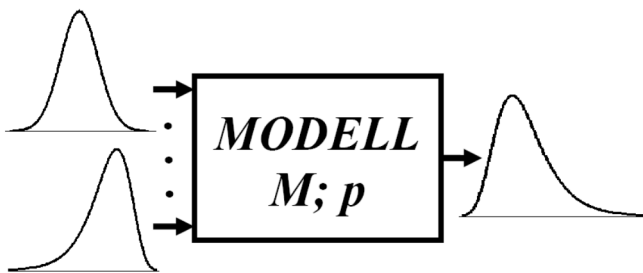
A dolgozat az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet röviden bemutatja a Monte-carlo Szimulációt. A 3. fejezetben – egy egyszerű példaként vizsgált – helikopter leszállóhelyek zajkibocsátását írjuk le. A 4. fejezetben a helikopter leszállóhelyek zajkibocsátás Monte-Carlo Szimulációs elemzését szemléltetjük. Végezetül összegezzük tanulmányunkat.

2. A MONTE CARLO SZIMULÁCIÓ

Monte-Carlo módszernek nevezzük a matematikai modellek megoldásának véletlen mennyiségek modellezését felhasználó numerikus módszereit, és azok jellemzőinek statisztikus értékelését (Pokorádi László; 2008).

A módszert széles körben alkalmazzák különböző események lehetséges kimeneteleinek és azok valószínűségeinek szimulációjára, amikor a rendszert gerjesztő paraméterek valamilyen mértékű parametrikus bizonytalansággal bírnak. Lényege, hogy az egyes bizonytalan gerjesztésekhez rendelt valószínűség-eloszlás alapján véletlenszerűen választunk ki értékeket, amelyeket a szimulációs vizsgálat egy-egy kísérletében használunk fel (1.ábra).

A Monte-Carlo módszer legnagyobb előnye, hogy nincs szükség a sokszor igen bonyolult analitikus vagy numerikus módszerekkel történő modellmegoldásra, hanem „csupán” véletlen számok gyors és hatékony generálásával válaszolhatók meg a feltett kérdések. A mintavételezést sokszor elvégezve a kapott eredményeket meghatározhatjuk, valamint megbecsülhetjük a várható rendszerválaszok valószínűségi eloszlásait.



1. ábra: Monte-Carlo Szimuláció

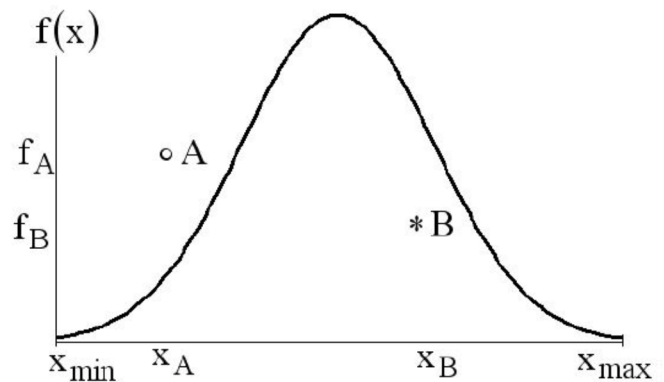
Ha egy fizikai rendszer viselkedésében, időfejlődésében a véletlenszerűségnek domináns szerepe van, akkor a rendszert sztochasztikusnak tekintjük. Ebből adódóan a Monte-Carlo módszer alapproblémája a véletlenszerűség számítógépes megvalósítása, amit véletlen számok (mint bemenő adatok) generálásával érhetünk el.

A bemenő jellemzők értékeit a tapasztalatok, valamint a mérési eredmények statisztikai kiértékeléseinek alapján generáljuk. Ehhez a Neumann-féle dob-elvet (hit and miss), vagy más néven a kiszorításos módszert célszerű használni (2. ábra).

A kiszorításos eljárás lényege a következő: az egyenletes eloszlású véletlen szám generátor (ezzel minden programnyelv rendelkezik) felhasználásával kiválasztunk a gerjesztési tartományon belül egy x értéket, majd ehhez hozzárendelünk egy y_x véletlen értéket. Az előre meghatározott sűrűség függvény alapján döntünk a generált x számról:

– ha $y_x > f(x)$, „elvetjük” az adott x értéket (lásd A pont a 2. ábrán);

– ha $y_x < f(x)$, „megtartjuk” és a szimuláció során, mint input érték alkalmazzuk az adott x értéket (lásd B pont a 2. ábrán).



2. ábra: Kiszorításos véletlen szám generálás szemléltetése

A modellt a fenti módon kiválasztott kiinduló adatokkal lefuttatjuk, majd a mintavételezést kellően sokszor elvégezve a kapott eredményeket – a vizsgálati cél alapján –, például statisztikailag kiértékeljük. Meghatározhatjuk a várható rendszerválaszok valószínűségi eloszlásait, vagy azok lehetséges minimum, illetve maximum értékeit.

A módszer egyik hátránya, hogy a pontos elemzés elvégzéséhez sokszor kell lefuttatni a szimulációs programot. A másik nagy kérdés a szimulációs eljárás alkalmazásakor „kellően sok” gerjesztés számának meghatározása. Erre csak eset specifikus választ tudunk adni (Pokorádi László, Molnár Boglárka; 2013).

3. HELIKOPTER LESZÁLLÓHELYEK ZAJKIBOCSÁTÁSA

A Bevezetésben megfogalmazott, a környezetvédelmi vizsgálatok során fellépő modellezési bizonytalanságok Monte-Carlo szimulációs elemzésének bemutatására egy helikopter leszállóhelytől várható zajterhelés becslését mutatjuk be tanulmányunkban.

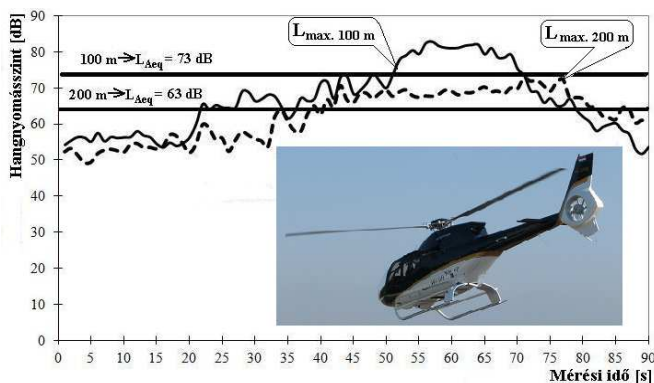
A helikopter leszállóhelyek létesítésével és működtetésével összefüggésben minden napos feladattá vált a repülési zaj kezelése.

A laikusok többsége és a lakosság a helikopter leszállóhelyek környezeti hatását a zajterheléssel azonosítja. Egyéb hatásra, például levegőterhelésre, talaj- és vízszennyezésre, vagy hulladékok keletkezésére a legtöbb esetben nem gondolnak. Ennek az oka, hogy ezek a hatások sok esetben inkább pozitív eredményt adnak, vagy az összegzett hatás mértékét nem minősítik jelentősnek. 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, (Hullah Peter; 2008) alapján:

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

ahol:

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



3. 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 mód-

szer 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 a 3. ábrán. A bemutatott vizsgálati eredmény egy fix terhelési pont felett 100 m-en, majd 200 m-en történt átrepülés zajszint-idő függvénye.

A környezetvédelmi rendszert ugyanakkor számos belső és külső tényező befolyásolja, ezek együttes figyelembevétele összetett feladatot jelent egy repülési feladat környezeti hatásainak elemzésére használt modell felállításánál. Ezt a tényt az átlagértékek képzése és az egyadatos határértékek alkalmazása, a végeredményként alkalmazott egyszámos helyettesítő adat nem kezeli megfelelő módon, a rendszer lényegi elemei vesznek el vagy szorulnak háttérbe a vizsgálatoknál.

Példaként említjük, hogy a zajhatásokat leíró paramétereknél a zavaró hatás kétféle módon jelentkezik. Egyrészt a repülés műveleti zaja, másrészt a zaj időbelisége miatt fellépő sztochasztikus jelleg miatt. Ezért fontos, hogy a rendszer elemzését követő esetleges szabályozást a repülési műveletek időbeliségére, abból adódó jellegére és a bekövetkezési gyakoriságra is kiterjesszük. Emellett a mért és észlelt zajjellemzőket a kibocsátási és a hangterjedési viszonyok olyan mértékben és jelleggel befolyásolják, ami egyértelműen a sztochasztikus jellemzőre irányítja rá a figyelmet.

A 3. ábrán szemléltetett grafikon 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 módzat 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 zajesemény szint érték mellett a műveletszám is jelentősen befolyásol. Kérdés: a műveletszám eseti növelése milyen mértékűt 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-egy leszállóhelyen. Tehát lehetséges olyan időszak egy repülési nap, amikor a kis számú 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 is, hogy a műveletszám megváltozásával egy-egy érintett terület felett,

illetve egy átrepülési útvonalon milyen zajszint növekedés következhet be, és ebben az esetben mekkora a határérték túllépés valószínűsége? A kérdésre keressük a választ a továbbiakban.

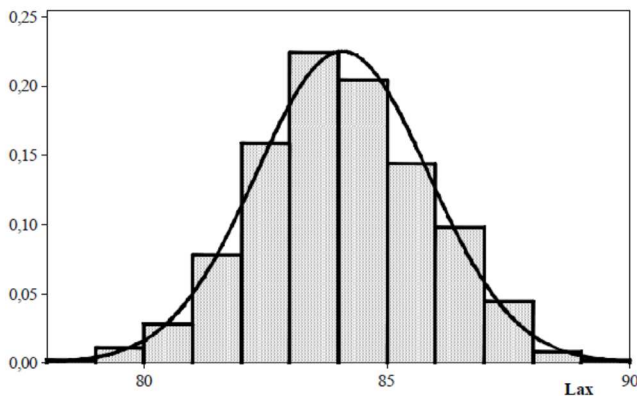
4. HELIKOPTER LESZÁLLÓHELY ZAJKIBOCSÁTÁSÁNAK MONTE-CARLO SZIMULÁCIÓJA (ESETTANULMÁNY)

A vizsgált helikopter leszállóhely átlagos napi műveletszáma – ha adott napon onnan fel- vagy leszállás történt – közel egyenletes eloszlással 1 és 5 közötti. A leszállóhelyet használó helikopterek által gerjesztett átlagos repülési zajeseményszintek – a gépek típusa, és terhelése, valamint az időjárás helyzet függvényében – 78 dB és 89 dB közötti értékkel bírnak. Az átlagos repülési zajeseményszintek ($L'_{AX-méri}$) egyszerű statisztikai elemzése alapján kijelenthető, hogy megfelelő közelítéssel normál eloszlásúként kezelhető a kialakult helyzet az 1. táblázatban megadott paraméterekkel.

Eseti tevékenységeknél, egy párnapos kulturális rendezvény ideje alatt a leszállóhely forgalma körülbelül 6 – 10 művelet/nap közötti értékre növekedhet. Kérdésként merült fel, hogy ekkor a leszállóhelytől származó repülési zajterhelés milyen mértékű lesz, illetve milyen valószínűséggel lépi túl a megengedett 65 dB határértéket?

A feltett kérdésekre várt válaszokat a helikopter leszállóhelytől származó zajterhelés Monte-Carlo szimulációs becslésével határoztuk meg.

A Monte-Carlo szimulációs hatáselemzés során alkalmazott determinisztikus modell a fentiekben leír (1) egyenlet lesz, 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.

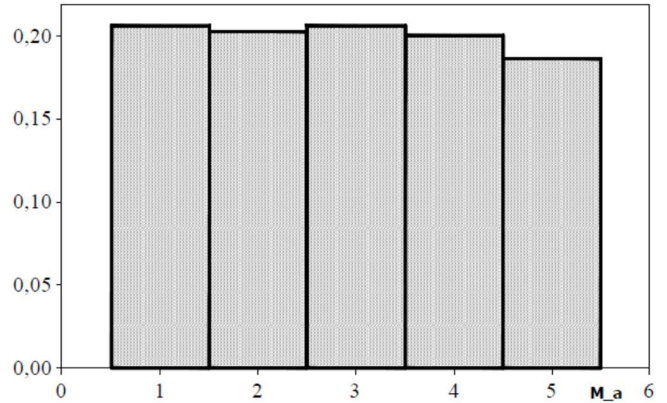


4. ábra Az átlagos repülési zajeseményszint ($L'_{AX-gerj}$) hisztogram

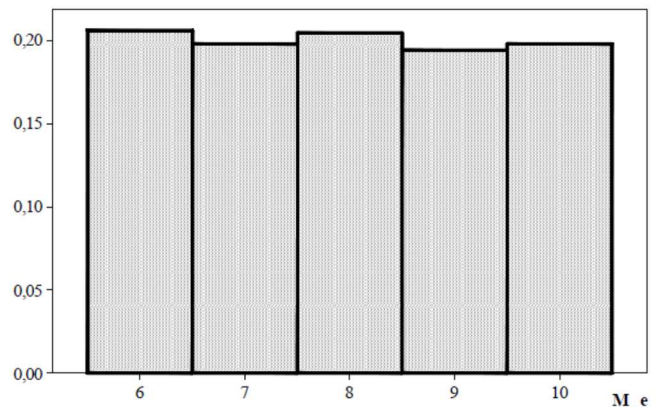
Mindkét esetre ugyanazon átlagos repülési zajeseményszint gerjesztési értékeket alkalmaztunk, mivel a helikopterek típusai, terhelései várhatólag jelentős mértékben nem fognak el-

térni a normál napi „alap” esetektől. A szimulációk során alkalmazott gerjesztési hisztogramjaikat a 4. – 6. ábrák szemléltetik.

A két szimuláció eredményeinek hisztogramjait az 7., illetve a 8. ábrák szemléltetik, főbb statisztikai adataik az 1. táblázatban találhatóak meg. Az azonos vízszintes skálával felvett két eredménygrafikon jól szemlélteti a repülési zajterhelések változását.



5. ábra „Alap” repülési műveletszám hisztogram



6. ábra „Esemény” repülési műveletszám hisztogram

Az elvégzett vizsgálat alapján az alábbi főbb következtetések vonhatóak le:

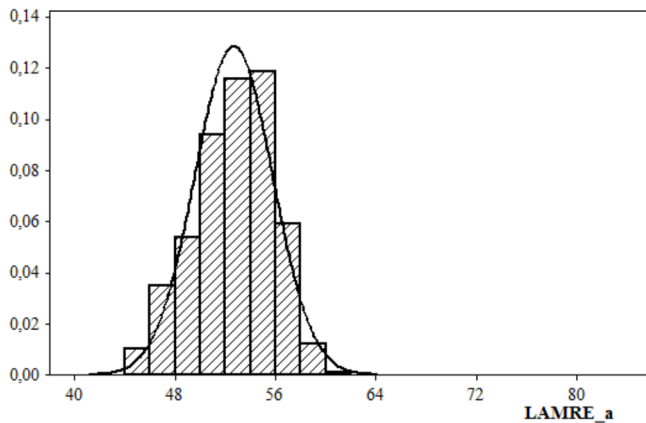
1. Az egyedi zajeseményszint értékek a kibocsátó forrás és az észlelés jellemzői miatt a 65 dB-es értéket minden esetben meghaladják. Ezért célszerű az egyszámjegyű értéket adó átlagolás helyett a zajszint értékek adott körülmények melletti – műveleti és kibocsátási jellemző, hangterjedési viszonyok – bekövetkezési valószínűségét figyelembe venni az értékelésnél.
2. A Monte-Carlo Szimuláció jól alkalmazható a helikopter leszállóhelyek zajterhelésének, és így a légi közlekedés környezeti hatásainak, korszerű elemzésére.
3. A grafikonokat szemlélve megállapítható, hogy bár az átlagos műveleti szám az „alap”-hoz képest jelentősen növeke-

dett, az átlagos megítélési zajterhelés csak kis mértékben emelkedett. Ez megfelel az akusztikában alkalmazott logaritmikus számítási eljárás logikájának, a „tíz meg tíz az tizenhárom” szabálynak.

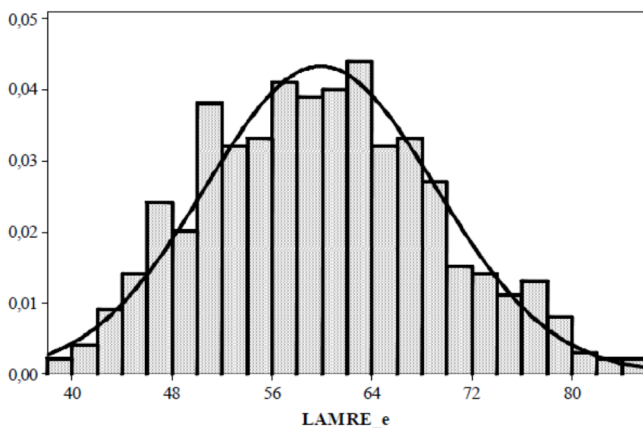
4. Kimutatható, annak a valószínűsége, hogy a helikopter le szállóhely által keltett repülési zajterhelés meghaladja a 65 dB-es határértéket,

- átlagos napi forgalom esetén $3.48 \cdot 10^{-5}$ gyakoriságot jelent, ami elhanyagolható (gyakorlatilag nulla) érték;
- a tervezett rendezvény esetén ez az érték 0.28885 (kb. 29 %), ami a szervezők részére – alakosság irányában – kifejtendő feladatot (például előzetes tájékoztatást, szimpátiakeltést) jelenthet.

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.



7. ábra „Alap” repülési zajterhelés hisztogram



8. ábra „Esemény” repülési zajterhelés hisztogram

1 Táblázat. A szimuláció adatainak statisztikai elemzése

	Min.	Átlag	Max.	Szórás
$L'_{AX} - mért$ [dB]	78	84	89	1.830
$L'_{AX} - gerj$ [dB]	78.031	84.083	89.362	1.782
M_{alap}	1	2.958	5	1.404
$L_{AM, re - alap}$ [dB]	44.900	52.673	60.100	3.100
$M_{esemény}$	6	7.98	10	1.148
$L_{AM, re - esemény}$ [dB]	39.100	59.878	85.400	9.223

6. ÖSSZEGZÉS

A dolgozat röviden bemutatta a Monte-Carlo szimuláció alkalmazási lehetőségét a repülés környezeti hatásainak korszerű elemzésére. Egy ilyen elemzés hatékonyan segítheti a munkánkat, amikor mérlegelni kell egy környezeti beavatkozás jelentőségét és a várható hatást, rámutatva, hogy nem érdemes bonyolult és hosszadalmas vizsgálatot végezni egy rövidebb vagy eseti környezethasználat miatt.

A Szerzők korábbi eredményeikre és más kapcsolódó munkákra alapozva tervezik jövőbeli tudományos tevékenységüket folytatni. Ennek keretében olyan kockázat- és bizonytalanság elemzési módszereket és eljárásokat terveznek kidolgozni, melyek segíthetik a környezetvédelmi szakemberek és döntéshozók munkáját. Emellett olyan vizsgálati módszer kidolgozása is célkitűzésük, ami akkor lesz alkalmazható, mikor egy repülési tevékenység miatt már jelentős, a környezetvédelemmel és a lakosság tájékoztatásával összefüggő feladatsort kell ellátni.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bera József, Pokorádi László (2010). Helikopterzaj elmélete és gyakorlata. Campus Kiadó, Debrecen.
- Hullap, Peter (ed.) (2008). State of the Art on Tradable Permits, Noise Legislation, Noise Restriction Methods and Noise Modelling, European Commission.
- Pokorádi László (2008). *Rendszerek és folyamatok modellezése*, Campus Kiadó, Debrecen.
- Pokorádi László, Molnár Boglárka (2013). Hidraulikus rendszer parametrikus bizonytalanságának Monte-Carlo szimulációs elemzése, *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban* 2013. pp. 171-180.
- Sobor Ákos (1982). Az egyenértékű zajszint alakulása a repülőgépek útvonalának szóródása függvényében, *Kép és Hangtechnika XXVIII.* pp. 190-192.