

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Meteorológiai információk szerepe a CNOSSOS-EU zajmodellben

ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT



Készítette:

Fritz Petra

Meteorológus mesterszak

Témavezető:

dr. Weidinger Tamás

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2023.

Tartalom

1.	Bevezetés.....	3
2.	A zajszennyezés, mint környezeti probléma	4
3.	A hangterjedés fizikája	5
3.1.	A hangterjedés	5
3.2.	A szél hatása	8
3.3.	A felszínközeli réteg hőmérséklet- és szélprofiljai.....	8
3.4.	A Pasquill-Gifford-féle stabilitási kategóriák.....	11
4.	Zajtérképek.....	13
5.	Zajmodellek meteorológiai adatháttere	14
5.1.	CNOSSOS-EU.....	14
5.2.	NORD2000.....	15
6.	A zajtérképekhez szükséges meteorológiai preprocesszor	17
6.1.	Elméleti háttér	17
6.2.	Bemenő adatok	20
6.3.	A planetáris határréteg szerkezete, napi menete	21
6.4.	Hangsebesség-profilok	22
6.5.	Valószínűségi kategóriák a forrás és a receptor pont helyzetétől függően.....	29
7.	Eredmények.....	30
7.1.	Valószínűségi eloszlások, hangsebesség-profil típusok, napszakos gyakoriságok	31
8.	Összefoglalás.....	38
	Köszönetnyilvánítás	39
	Irodalomjegyzék.....	40

1. Bevezetés

A légköri zajterjedés modellezése, a terjedési folyamatokat alakító meteorológiai tényezők ismerete gyakorlati jelentőséggel bír. Mindennapi életünket, egészségünket is befolyásolja a közlekedésből, ipari termelésből, de a szórakozásból és a szabadtéri koncertekből származó zajterhelés is. A zajszennyezés a környezetkárosítás egyik „legrégebbi” formája. Olyan, emberi tevékenység következtében létrejött túlzott mértékű zaj, amely károsító, illetve zavaró hatással lehet az emberi egészségre (*Domokos és Horváth*, 2011). Különösen éjszaka lehet zavaró a zajhatás. A zajterhelés ismerete és szabályozása fontos környezetvédelmi feladat, ami mikrometeorológiai ismereteket is igényel (*Kiss és Tasnádi*, 2012).

Az Európai Unió 2015-ben egyezett meg a zajtérképek készítésének harmonizációjában. Az ehhez kapcsolódó CNOSSOS-EU (Common Noise Assessment Methods in Europe – Közös európai zajértékelési módszertan) zajmodell kialakítását az elkövetkező években kell bevezetni a tagországokban. A modell részletes meteorológiai adatbázist igényel a hangsebességi profilok meghatározásához a forrás és receptor pont között, amihez jelentős számításigény társul. Így a mikrometeorológia fontos eleme az új szabályozási rendszernek. El kell különíteni a zajterjedés szempontjából kedvező és kedvezőtlen helyzeteket, ami természetesen függ – egyéb meteorológiai állapothatározók mellett – a forrás-receptor egymáshoz képesti helyzetétől is.

TDK dolgozatom célja, hogy bemutassa az ELTE TTK Meteorológiai Tanszékén folyó zajterjedési modellhez tartozó meteorológiai preprocesszor kialakítását. A K + F + I munkába 2021-ben kapcsolódtam be. Feladatomból volt a témakör szakirodalmának áttekintése, meteorológiai állomási adatok rendszerezésre állásának ellenőrzése és részvétel az adatbázis-építésben. Ezt a Meteomanz és az Ogimet internetes oldalakon található szinoptikus állomási adatok segítségével végeztük. Részt vettem az adatok letöltésében és az Excel Makro programok fejlesztésében, amelyekkel az adatrendezést és a hiányzó adatok interpolálását végeztük. A minőségbiztosítás az adatok átnézésével, grafikonok rajzolásával zárult. Közreműködtem a meteorológiai preprocesszor programjának tesztelésében, az adatfeldolgozásban, a meteorológiai preprocesszor eredményeit bemutató ábrák készítésében, az eredmények kiértékelésében (*Weidinger et al.*, 2022. a, b, c).

2. A zajszennyezés, mint környezeti probléma

A környezeti zaj, különösen a közlekedésből (közút, vasút, légitözlekedés) származó zaj jelentős környezeti probléma. Európa lakosságának 20%-a van kitéve olyan zajszennyezésnek, mely egészségkárosító hatással bír, illetve emberek millióinak jólétét is érinti. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) szerint a zaj az egészségügyi problémák második leggyakoribb környezeti oka, közvetlenül a légszennyező részecskék (légtöri aeroszolok) után [1 – Európai Környezetvédelmi Ügynökség].

A hang intenzitásának mértékegysége, a logaritmus decibel (dB) skála, amely a hallás jellemzőihez igazodva a hallásküszöb (0 dB) és a fájdalomküszöb (120–130 dB) között alakul. A mindennapi életben a 30–90 dB közötti zajok a leggyakoribbak.

A környezeti szabványok részletesen meghatározzák a különböző zajszennyezési határértékeket. Magyarországon üzemi létesítményekre a napi átlag zajterhelés 56 dB, az éjszakai pedig 50 dB. Közlekedési forrásokra a napi átlag 73 dB, az éjszakai 65 dB. Kiemelt fontosságúak az egészségügyi és oktatási intézmények. Az optimális zajhatás kisebb kell, hogy legyen 35 dB-nél. [2 – I.7. Zajterhelés, Budapest Környezeti Állapotértékelése 2019–2020.]

Budapest lakosságának mintegy 30–35%-a egészséget veszélyeztető zajhatásban él. Az éjszakai és nappali zajszintek közötti különbség mindössze átlagosan 4–7 dB, azaz jelentős az éjszakai zajterhelés. A fővárosban a közúti közlekedés lakossági zajterhelése a legjelentősebb a környezeti zajforrások közül, illetve lényegesen nagyobbak a problémák a belvárosban, mint a kertvárosban. [2 – I.7. Zajterhelés, Budapest Környezeti Állapotértékelése 2019–2020].

A zajszennyezés egyre nagyobb jelentőséggel bír, hiszen azzal, hogy egyre növekedik a Föld népessége, a társadalomnak nagy része dönt a nagyvárosi életmód mellett, ahol a népesség sűrűsége is egyre növekvő tendenciát mutat. A népességnövekedés magával vonja a gazdaság átalakulását is, így az iparilag fejlettebb területeken egyre komolyabb problémát okoznak a zaj okozta károk (Kiss és Tasnádi, 2012).

3. A hangterjedés fizikája

3.1. A hangterjedés

A hang sűrűségi hullám. Terjedési sebessége (c , m/s) a p nyomású (Pa), T hőmérsékletű (K), e parciális vízgőznyomású (Pa) nedves levegőben (Foken, 2017):

$$c = \sqrt{\kappa \cdot R_d \cdot T \left(1 + 0,38 \frac{e}{p}\right)} = \sqrt{\kappa \cdot R_d \cdot T_v}, \quad (1)$$

ahol $\kappa = c_{pd} / c_{vd}$ a száraz levegő állandó nyomáson és állandó térfogaton vett fajhőjének a hányadosa, ami kétatomos gázokkal számolva 1,4. $R_d = 287$ J/kg K a száraz levegő specifikus gázállandója. T_v a virtuális hőmérséklet (K).

A hang terjedési sebessége függ a szélesség (u) és a hőmérséklet (pontosabban a virtuális hőmérséklet) magasság szerinti változásától, és a hangterjedés irányától, attól a φ szögtől, amit a pontbelinek tekintett zajforrás és a szélzászló zár be egymással a „kör közepén” lévő receptor pontból nézve (1. és 2. ábra). Egyszerűsített formulája:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0,6 \frac{\partial T}{\partial z} + 0,4 \cdot \cos \varphi \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (2)$$

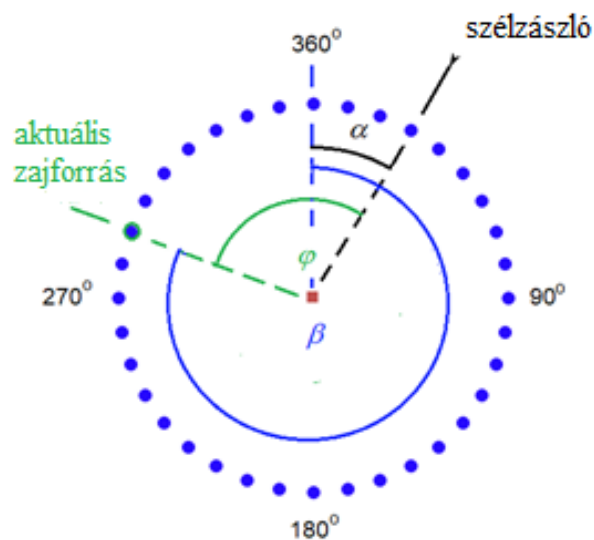
A képletben szereplő deriváltak szokásos mértékegységei: u , c [m/s], z [m], T [K], s ennek megfelelően kell tekinteni az állandókhoz „rendelt” mértékegységeket is.

Teljes hátszél esetén a zajforrás felől a receptor pont felé fúj a szél. Ekkor az aktuális szélirány (a szélzászló) és a zajforrás közötti szög $\varphi = 0^\circ$, szembeszél esetén $\varphi = 180^\circ$, míg teljes oldalszél esetén $\varphi = 90^\circ$, illetve $\varphi = 270^\circ$.

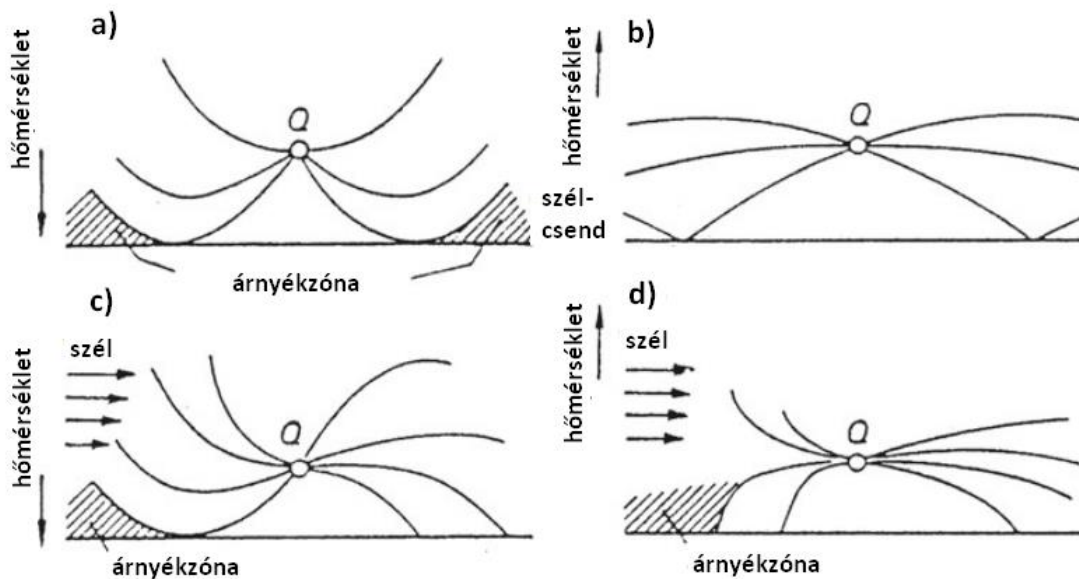
Ha a hang „akusztikailag” különböző sűrűségű közegbe jut, akkor megtörik. Ha pl. „akusztikailag sűrűbb”, kisebb terjedési sebességű (pl. kisebb hőmérsékletű) közegből „akusztikailag ritkább” közegbe jut, akkor megtörik, növekszik a beesési merőlegessel bezárt szög. A hullám terjedési sebessége az „akusztikailag ritkább” közegbe jutva növekszik. Megváltozik a hangterjedés iránya és a két közeg határára érkező hanghullám törési szöge (a felület normálisával bezárt szög). A két szög szinuszának az aránya megegyezik a két közegbeli hangsebesség arányával. Ez a hullámtanban jól ismert Snellius–Descartes-törvény (Garrett, 2020).

Inverziós esetben, amikor a hőmérséklet nő a magassággal a felszín közelében (éjszakai stabilis határréteg), a hangsebesség is nő a magassággal. Míg nappal labilis rétegződés esetén, amikor a hőmérséklet csökken a magassággal, a hangsebesség is csökken felfelé haladva.

A terjedés szempontjából „labilis esetben” megjelenik egy árnyékszóna a felszín közelében, a forrástól távolabb. Így a labilis rétegződés a zajterjedés szempontjából kedvezőtlen, míg a stabilis rétegződés (inverzió) kedvező viszonyokat jelent, hiszen az optikailag ritkább közegből halad a hang az optikailag sűrűbb közegbe, s teljes visszaverődést szenvedhet, megnövelve a felszínközeli zajszintet a forrástól távol. Indifferens rétegződés esetén (a hőmérséklet nem változik a magassággal) a zajterjedés szempontjából kedvezőtlen helyzetbe soroljuk az adott órát (vagy az adott esetet). Az indifferens rétegződést a légköri stabilitás félempirikus meghatározási módszerei alapján adjuk meg. Kiindulásként a Pasquill-Gifford-féle stabilitási osztályokat használjuk (Bailey et al., 1995; Szűcs, 2014). Ezt a képet módosítja a szélesebbesség magasságszerinti változása (szélnyírás) és a szélirány (2. ábra). **(Megjegyezzük, hogy ami a zajterjedés szempontjából kedvező, az a zajterhelés szempontjából kedvezőtlen helyzet ugyanolyan forráserősség mellett.)**



1. ábra: Forrás-receptor kapcsolat szemléltetése óras adatok alapján. Adott szélirány (α) esetén a 10 fokonként elhelyezett feltételezett zajforrás és a „szélzászló” által bezárt φ szög a receptor pontból nézve. A hipotetikus zajforrásokat a kék körök, míg a receptor pontot a piros téglalap jelöli. A β szög a zajforrás helyzetét mutatja. Minden órában megadjuk a 36 hipotetikus forrásra vonatkozó terjedési kategóriát (kedvező vagy kedvezőtlen).



2. ábra: Zajterjedés a hőmérsékleti rétegződés függvényében szélcsendes időszakokban. A zajterjedés szempontjából kedvezőtlen esetben (kis zajterhelés – a hőmérséklet nő a felszín felé haladva, illetve nem változik a magassággal) a), és kedvező esetben (magas zajterhelés – a hőmérséklet nő a magassággal (inverziós rétegződés), nem alakul ki árnyékkzóna) b), A zajterjedés módosulása a szélesebbégi profil ismeretében c) és d). Foken (2017) és VDI (1988) alapján.
(Az árnyékkzóna kialakulása mérsékli a zajterhelést.)

A sűrűbb közegből (kisebb hangsebesség, alacsonyabb hőmérséklet) a ritkább közegbe (nagyobb hangsebesség, magasabb hőmérséklet) haladva a törési szög növekszik. Ilyen inverziós rétegződés esetén előfordulhat, hogy a kibocsátott hang a sorozatos törések és a teljes visszaverődés után visszajut a földre (2.b ábra). Ha a hangsebesség csökken a magassággal (pl. a nappali órákban), a törés is ellenkező irányú: kialakul egy árnyékkzóna, ami a zajterhelés szempontjából kedvező helyzetet jelent (2.a ábra).

A zajterjedést módosítja a forrás-receptor irányába eső relatív szélesebbégi profil (szembeszél, oldalszél, illetve hátszél). Hátszélről akkor beszélünk, ha a zajforrás felől fúj a szél, vagyis a hangterjedés irányába mutat, azt növeli (2.c, d ábra). Megjegyezzük, hogy a teljes oldalszélnek (a szélvektor merőleges a forrás-receptor pont egyenesére) nincs hatása a hangterjedésre. A szembeszél a Doppler-elv alapján csökkenti a hangterjedés sebességét.

3.2. A szél hatása

Mivel a szél- és a hangsebesség „összeadódik”, a hang terjedése hátszélben („szélirányban”) „gyorsabb”, míg ellenszélben „lassabb”. A talaj közelében a növényzet és a beépítettség miatti súrlódás csökkenti a szélesebességet, ezért minél közelebb vagyunk a felszínhez annál kisebb a szélesebesség. Így a magasabb légrétegekben a hang terjedési sebessége szélirányban növekszik, ellenszélben csökken. A hanghullámok legrövidebb útja ezért hátszélben a talaj irányába, szembeszélben a talajtól távolodva „görbül”.

Szembeszél esetén (a terjedési irányból nézve) a hanghullámok a talajtól egy bizonyos távolságra már nem érik el az észlelőt, ennek következtében hangárnyék alakul ki. Ezért egy átmeneti zóna mögött lévő területen a hangnyomásszint csökkenése léphet fel, ennek mértéke a 30 dB-t is elérheti.

A terjedő hanghullámokat a talaj részben visszaveri. Ezek a visszaverődések részlegesen vagy esetleg teljesen is megszüntethetik az akadályok miatti hangnyomásszint-csökkenéseket.

A szélesebesség változása helytől, időtől és magasságtól függ. Ez a hangnyomásszint változását, ingadozását eredményezi, főleg a hangforrástól távolabb, kiváltképp viszonylag csekély kiterjedésű hangforrások esetén. A hangforrás erős irányítottsága ezt a hatást növelheti.

A hangterjedés szabálytalanságait „a levegő turbulenciái” is erősíthetik. Az örvények a hangenergiát szétszórják, illetve elnyelik. Ezek a hatások azonban általában elhanyagolhatók. Kivételt képeznek az olyan hangterek, amelyekben erős irányítottságú hangforrások vagy árnyékszónák vannak [3 – 2002, Magyar szabvány. MSZ 15036].

3.3. A felszínközeli réteg hőmérséklet- és szélprofiljai

A légköri stabilitást a potenciális hőmérséklet magasságszerinti változása alapján jellemezzük. Labilis rétegződés esetén, a nappali órákban a potenciális hőmérséklet,

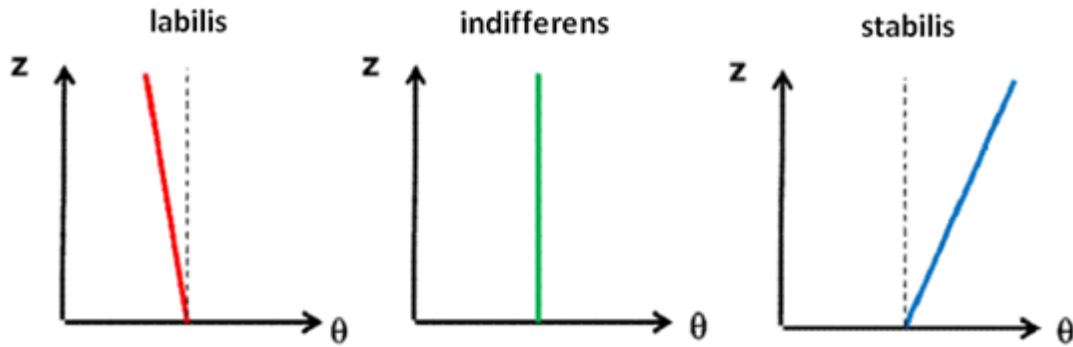
$$\Theta = T \cdot \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{R_m}{c_{pm}}} \quad (3)$$

a felszínközeli rétegben csökken a magassággal (3. ábra), majd a keveredési rétegben közel állandó lesz. A felszíntől melegszik a légkör. (Itt p [hPa] az aktuális $p_0=1000$ hPa a referencia nyomás; az m alsó index a nedves levegőre utal.)

A potenciális hőmérséklet magasságszerinti változása helyett jó közelítéssel alkalmazhatjuk a hőmérséklet magasság szerinti változását (Götz és Rákóczi, 1981), hiszen:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma_d = \frac{\partial T}{\partial z} + 0,0976 \text{ (K/m)} . \quad (4)$$

Itt $\Gamma_d = \frac{g}{c_{pm}}$ a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens, ahol g a nehézségi gyorsulás.



3. ábra: felszínközeli réteg stabilitási viszonyai a potenciális hőmérséklet függvényében (Wenzel et al., 2013).

Indifferens esetben a potenciális hőmérséklet nem változik a magassággal, míg stabilis esetben (mindenekelőtt az éjszakai órákban) a hőmérséklet nő a magassággal (inverziós hőmérsékleti rétegződés).

A szélesebbesség a függőleges mentén a felszíntől távolodva növekszik. Az erre vonatkozó tapasztalati kapcsolatot egy hatványfüggvénnyel lehet kifejezni (Unger et al., 2012):

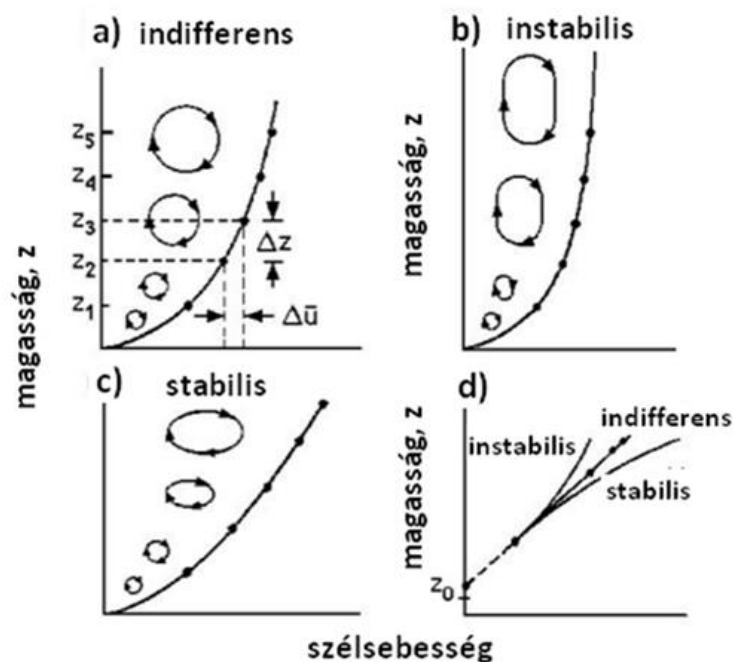
$$u(z) = u(z_{ref}) \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha , \quad (5)$$

ahol a referencia magasságban (z_{ref}) a szélesebbesség $u(z_{ref})$, míg az e feletti z magassági szinten $u(z)$. A referencia szint általában a standard meteorológiai szélmérések 10 m-es magassága. α a hatványkitevő.

Indifferens rétegződés esetén a szélesebbesség magasságszerinti változása fordítottan arányos a felszín feletti magassággal (z) és egyenesen arányos a dinamikus sebességgel (u_*). Az arányossági tényező a Kármán-konstans (κ) reciproka. Ez a logaritmusos szélesebbesség profil alapegyenlete:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{u_*}{z} . \quad (6)$$

Stabilis esetben ugyanolyan turbulens impulzusáram (így ugyanakkora dinamikus sebesség, u_*) mellett a szélssebesség jobban növekszik a magassággal (lineáris, illetve logaritmikus-lineáris profilközelítés), míg labilis rétegződés esetén (amit nagyobb karakterisztikus méretű örvények jellemeznek) a szélssebesség kevésbé nő a magassággal, mint logaritmikus rétegződés esetén (4. ábra) (Junge and Westerhellweg, 2011).



4. ábra: felszínközeli réteg szélprofiljai a) indifferens, b) instabilis és c) stabilis légrétegződés esetén. A stabilis és a labilis egyensúlyi helyzet szélprofiljainak eltérése a logaritmikustól. Stabilis rétegződés esetén a szélssebesség jobban nő a magassággal, mint labilis rétegződés mellett. (Junge and Westerhellweg (2011) alapján).

Az elmélet szerint (állandó turbulens áramok a felszínközeli rétegben) a szél csak egy meghatározott szinten, az érdességi szinten kezd el a fent említett profiloknak megfelelően növekedni. E szint az érdességi magasság (z_0), ami a felszín aerodinamikai mérőszáma. Nagysága arányos a felszíni érdesség elemeinek magasságával, valamint függ azok alakjától és területi eloszlásától (Unger et al., 2012). Magas vegetáció, illetve városi területek felett egy megemelt alsó határfelülettel is kell számolnunk, ahonnan a profilszámítás indul. Ez a szint a kiszorítási rétegvastagság szintje (d), ami az érdességi elemek átlagos magasságának hozzávetőlegesen 2/3-a, de ez is függ a felszín alakjától és az érdességi elemek szerkezetétől is (Arya, 2001; Foken, 2017).

3.4. A Pasquill-Gifford-féle stabilitási kategóriák

A stabilitás jellemzésére többféle módszer, illetve mutatószám szolgál. A leggyakrabban alkalmazott Pasquill–Gifford-féle stabilitási osztályokat a talajközeli szél mérés és a borultság alapján lehet megállapítani (Bihari, 2007; Szűcs, 2014). Ezek a kategóriák az 1. és a 2. táblázatban láthatók az erősen labilistól (A) az extrém stabilis (G) osztályig. Nem mindig kezelik külön az extrém labilis rétegződést (G) a mérsékelten stabilistól (F). Az egyes osztályokhoz tartozó turbulencia karakterisztikák aktuális értékeit a felszínborítottság (érdességi magasság, z_0) és a felszínfeletti magasság alapján tovább pontosíthatják (Hunter, 2012). *(Megjegyezzük, hogy a meteorológiai mérések automatizálásával egyre kevesebb helyen végeznek felhőborítottság méréseket, ami nehézséget okoz a módszer alkalmazásában. Egy lehetséges megoldást jelent az egyre jobban bővülő reanalízis (pl. ERA5) és műholdas adatbázisok alkalmazása.)*

Szél (u) [m/s]	Nappal, bejövő sugárzás [W/m^2]				1 óra napkelte után, vagy napnyugta előtt	Éjszaka, felhőzet [okta]		
	> 600	300–600	<300	borult ég		0–3	4–7	8 (borult ég)
$u \leq 1,5$	A	A–B*	B	C	D	F–G**	F	D
$1,5 < u \leq 2,5$	A–B	B	C	C	D	F	E	D
$2,5 < u \leq 4,5$	B	B–C	C	C	D	E	D	D
$4,5 < u \leq 6,0$	C	C–D	D	D	D	D	D	D
$6,0 < u$	D	D	D	D	D	D	D	D

* A két kategória közötti választás az aktuális szélesség és felhőborítottsági adatok alapján történik.

** A G kategóriát adjuk meg, ha a szélesség nem haladja meg a 0,5 m/s-ot és a felhőzet 1 okta alatti (0, vagy pl. 1/10 az adatbázis felbontásától függően). A G kategóriát nem minden modellben alkalmazzák a további számításokban.

1. táblázat: a Pasquill–Gifford-féle stabilitási kategóriák (A – erősen labilis, – mérsékelten labilis, C – gyengén labilis, D – semleges, E – gyengén stabilis, F – mérsékelten stabilis, G – extrém stabilis) meghatározása a szélesség, a napszak és a felhőzet alapján Attenborough (2014) alapján. (A csomóban történő szélesség miatt van a 0,5 m/s-os skálabeosztás.)

Stabilitási osztály	Pasquill-kategória	$\frac{\Delta T}{\Delta z}$ [K/100 m]**	Szélirány-szórás (σ_e)*** [fok]	Szélprofil kitevő**** (p)	
				Vidék	Város
Erősen labilis	A	$\frac{\Delta T}{\Delta z} < -1,9$	$\sigma_e > 22,5$	0,07	0,15
Mérsékelten labilis	B	$-1,9 \leq \frac{\Delta T}{\Delta z} < -1,7$	$22,5 \geq \sigma_e > 17,5$	0,07	0,15
Gyengén labilis	C	$-1,7 \leq \frac{\Delta T}{\Delta z} < -1,5$	$17,5 \geq \sigma_e > 12,5$	0,10	0,20
Indifferens	D	$-1,5 \leq \frac{\Delta T}{\Delta z} < -0,5$	$12,5 \geq \sigma_e > 7,5$	0,15	0,25
Gyengén stabilis	E	$-0,5 \leq \frac{\Delta T}{\Delta z} < +1,5$	$7,5 \geq \sigma_e > 3,8$	0,35	0,30
Mérsékelten stabilis	F	$+0,5 \leq \frac{\Delta T}{\Delta z} < +4,0$	$3,8 \geq \sigma_e > 2,1$	0,55	0,30
Extrém stabilis*	G	$+4,0 \leq \frac{\Delta T}{\Delta z}$	$2,1 \geq \sigma_e$	> 0,55	> 0,30

* Az extrém stabilis rétegződést (G) sok számításban nem tekintik külön osztálynak, beépítik az F kategóriába.

** Általában a légkör alsó néhány 100 m-es rétegét elemzik pl. i) magas toronymérések által meghatározott szintek, ii) alsó 300 m-es réteg, vagy iii) 1000–950 hPa-os réteg.

*** A szélirány-szórást a 10 m-es szintre vonatkoztatják, a standard szélmérési adatokból számolják.

**** A hatványkitevős profilegyenletet alkalmazzák az alsó néhány 100 m-es rétegben

$$u = u_1 \cdot (z/z_1)^\alpha$$

Itt a u_1 a z_1 referencia magasságban mért szélsébség, ami a meteorológiai gyakorlatban a 10 m-es magasságban (z_1) mért szélsébséget jelenti [4 – Basic Meteorological Process honlap alapján]

2. táblázat: a Pasquill–Gifford-féle stabilitási kategóriákhoz tartozó magasság szerinti hőmérsékletváltozás, szélirány-szórás, továbbá vidéki és városi területek feletti szélprofil kitevők [4 – Basic Meteorological Process honlap alapján].

Az érdességi magasság jellegzetes értékeit a 3. táblázat szemlélteti különböző felszínborítottsági kategóriákra.

Sok esetben a stabilitási kategóriát egy-egy átlagos évre vonatkoztatva a napszak és az évszak alapján adják meg az adott helyre. Ez első közelítésként megfelel klimatológiai, illetve szabályozás-orientált vizsgálatokra (Szepesi, 1981; Domokos, 2011).

Osztály	Felszínborítottság jellege	z ₀ [m]
Tenger	Nagy kiterjedésű vízfelszín	0,002
Zavartalan	Nincsenek tereptárgyak, növényzet elhanyagolható	0,005
Nyitott	Kismértékű növényborítás	0,03
Érdes-nyitott	Kismértékű növényborítás, néhány tereptárggyal	0,1
Érdes	Jelentős növényborítás, elszórtan több tereptárgy	0,25
Nagyon érdes	Kis sűrűségű, alacsony épületekkel beépített terület	0,5
Átfutó áramlást eredményező	Kifejlett erdő, városi terület, a tereptárgyak közti magasságkülönbség kicsi	1
Kaotikus	Városcsözpont, szabálytalan magasságú fákból álló erdős terület	≥2

3. táblázat: Davenport-féle érdességi osztályok Davenport et al., 2000 alapján (Domokos et al., 2014).

4. Zajtérképek

A környezet zaj állapotát legjobban zajtérképekkel lehet leírni. A zajtérkép térképes formában szemlélteti egy terület zajterhelését. Az elmúlt pár évben az Európai Unió országaiban a méréseken alapuló vizsgálatokat felváltották a számítással végzett elemzések, értékelések. A zajtérkép kiválóan alkalmazható zajcsökkentési intézkedések szemléltetésére [5 – Műszaki háttér-dokumentáció a stratégiai zajtérképekre épülő intézkedési tervek készítéséhez], [6 – Stratégiai zajtérkép és intézkedési terv, 2013].

A zajvizsgálat mérési, számítási értékeit zajtérképen tudjuk ábrázolni grafikus eszközökkel. Zajtérképek különféle céllal készülhetnek, mint például, hogy feltárják a zajos üzemszempontokat (üzemi zajtérkép), bemutassák egy település vagy nagyobb terület zajhelyzetét, megvizsgálják egy zajforrás területi szennyező hatását, azaz például hogyan alakul egy adott településen a közúti közlekedésből származó zaj. Ezek a térképek a lakosság számára érthető, világos módon vannak megszerkesztve, így bárki fel tudja mérni, mi az a zajállapot, amiben egy városlakó ma él (Bite és Pálffy, 2016). A zajterjedési modellek és a stratégiai zajtérképezés módszertanáról részletes leírás található többek között (Kiss, 2010; Hammer et al., 2014; [8 – Segédlet a stratégiai zajtérképekre épülő intézkedési tervek készítéséhez]).

A zajtérképek a jelentős zajforrások, zajforrás-csoportok (közút, vasút, üzemi forrás, repülési zaj stb.) által okozott terhelésen kívül információkat szolgáltatnak a zaj által érintett lakosság,

lakóépületek, érzékeny intézmények (pl. kórházak, iskolák) érintettségére vonatkozóan is [7 – Intézkedési terv, Halásztelek Város, 2018]. E térképek elkészítéséhez figyelembe kell venni a hangterjedést befolyásoló tényezőket, valamint szükség van a hangterjedési profilok receptor pont irányok szerinti eloszlásaira. A végső számításnál az összevonások után két típus (kedvező és kedvezőtlen terjedés) marad. Ez jelentős egyszerűsítés, ugyanakkor mégis előrelépés a korábbi statikus (részletes meteorológiai adatok alkalmazása nélküli) megosztáshoz képest.

Zajtérképeket modellszámítások (ismert forráserősségek és mikrometeorológiai viszonyok) mellett rögzített, illetve mobil zajmérések alapján is készíthetünk. Érdekességként megemlítendőek az új technika adta lehetőségek: egy okostelefon zajmérőként is működhet. Közösségi kutatások eredményeként több városban készült már így zajállapot-felmérés. Az okostelefonokkal történő zajmonitorozásnak számos előnyét foglalták össze, azonban vannak korlátai is ennek a technológiának (*Padilla-Ortiz et al., 2022*).

5. Zajmodellek meteorológiai adathátttere

A zaj-modellezésben általánosan használt meteorológiai állapothatározók (optimálisan legalább 5–10 éves órás adatsorok): a szélsébség és szélirány, a hőmérséklet, a nedvesség, a légköri stabilitás, ami kifejezhető pl. a napszak és a felhőzet, illetve a hőmérsékleti gradiens ismeretében. Fontos a felszínborítottság és a talajállapot (pl. a hóborítottság) is. Ha rendelkezésre állnak a turbulencia paraméterek (impulzus és a szenzibilis hőáram, valamint a dinamikus sebesség és a dinamikus hőmérséklet, továbbá az ezekből számítható Monin-Obukhov-féle úthossz), akkor a légköri stabilitás közvetlenül számítható.

5.1. CNOSSOS-EU

A CNOSSOS-EU egy harmonizált módszertant képvisel az EU-ban a fő zajforrásokból (közúti, - vasúti, - légi forgalom, ipar) származó zajszintek értékelésére. E módszertan (számítási eljárás) kerül alkalmazásra az újgenerációs (általában 5 évenként megújulásra kerülő) stratégiai zajtérképezésben (*Irányelvek, 2015; Parászka, 2020*). E módszertannak megfelelő zajterjedési modellhez kell elkészíteni a meteorológiai preprocesszort. E dolgozatban a meteorológia

preprocesszor felépítésével foglalkozom. A zajterjedési modellek részletes bemutatása, elméleti háttérének ismertetése megtalálható *Attenborough* (2014) könyvfejezetében, a meteorológiai vonatkozásokról pedig többek között a *NCHRP Rresearch Report 882* (2018) összefoglalóban olvashatunk. A zajterjedési modellek alapegyenletét természetesen bemutatjuk (6.1 és 6.2 fejezet).

Számunkra, mint adatszolgáltatók számára az a fontos, hogy megadjuk a *zajterjedés szempontjából kedvező* (magassággal növekvő hangsebességi profil) és a *kedvezőtlen esetek* (kis zajterhelés, kialakulhat az árnyékszóna – magassággal csökkenő vagy konstans hangsebességi profil) gyakoriságát, rögzített receptorponthoz adott irányból érkező zajterhelés számításához (1. ábra). A nemzetközi szakirodalom áttekintése után (*NORD2000*, 2006; *Defrance et al.*, 2007; *Maijala et al.*, 2016; *Nummelin and Poikolainen*, 2017) *kedvezőtlen zajterjedésnek* tekintettük azokat az eseteket, amikor az adott irányból érkező hangsebesség magasságszerinti változása 4 m-es magasságban, 10 cm-es átlagos érdességi magasság mellett negatív ($\frac{dc}{dt} \leq 0,0 \text{ m/s / m}$), vagy nulla a hangsebesség gradiense. Pozitív hangsebesség gradiensek esetén – vagyis amikor a hangsebesség nő a magassággal – az adott órát *kedvező zajterjedésűnek* tekintjük az adott irányból érkező zajterhelés szempontjából ($\frac{dc}{dt} > 0,0 \text{ m/s / m}$). Hasonló elvek szerint választják szét a terjedés szempontjából kedvező és kedvezőtlen eseteket a *NORD2000* terjedési modellben is (*NORD2000*, 2006).

Ismét megjegyezzük, hogy ***ami a zajterjedés szempontjából kedvező eset, az a zajterhelés szempontjából kedvezőtlen*** és fordítva.

5.2. NORD2000

Az újgenerációs zajterjedési módszertannak eleget tevő *NORD2000* hangterjedési modellt az északi-európai országok fejlesztették ki a kétezres évek elején. 25 stabilitási osztályt határoztak meg (*NORD2000*, 2006) a meteorológiai adatok ismeretében. Ehhez a meteorológiai állomásokon mért vagy éghajlati, illetve reanalízis (pl. ERA5) adatbázisból letöltött óras szélsősebesség értékeket, valamint mért vagy leszámaztatott légköri stabilitási értékeket használhatunk. Mi is ezt a módszertant adaptáltuk (*Fritz et al.*, 2021; *Weidinger et al.*, 2022.a, b, c)

A 25 hangsebesség terjedési kategória az 5 szélesebbességi és az 5 stabilitási osztály kombinációjából jön ki a szélirányok figyelembevételével (hátszél, keresztszél, szembeszél).

A meteorológiai állomáson mért szélesebbességi értékeket (10 m magasan 10 perces átlagérték) 5 kategóriába soroljuk. Szabványmódszert építünk, folytonos változókból diszkrét valószínűségi változókat készítünk. Egyszerűsítjük, egyúttal könnyebben kezelhetővé (szabványosíthatóvá) tesszük az egyes eseteket. Könnyebb az előállításuk és a nemzetközi összehasonlítás (EU-s irányelvről van szó). A 4. táblázat az öt szélesebbességi osztályt mutatja, míg az 5. táblázat a stabilitási osztályokat adja meg a napszak és a felhőzet függvényében. E két mennyiség közvetett módon a sugárzási viszonyokra enged következtetni.

A hangterjedés modellezéséhez, illetve a zajtérképek elkészítéséhez az első lépés a 25 stabilitási osztály relatív gyakoriságainak elkészítése sokévi meteorológiai adatsorok, valamint a napszak és a hangterjedés iránya (10 fokos felosztás) alapján adott meteorológiai állomásokra. A napot 3 részre osztjuk: nappal (06–18), este (18–22) és éjszaka (22–06), vagyis az egyes periódusok hossza rendre 12, 4 és 8 óra. Helyi időben CET vagy CEST dolgozunk. Ha megvannak a részletes gyakorisági eloszlások, akkor azokat már fel lehet integrálni napi, havi, évszakos, évi, illetve sokévi léptékre. Az egyes irányok megadják, hogy honnan jön a hang (1. ábra).

10 m-es szélesebbesség (u_{10}, m/s)	Szélesebbességi osztály
$u_{10} \leq 1$	W1
$1 < u_{10} \leq 3$	W2
$3 < u_{10} \leq 6$	W3
$6 < u_{10} \leq 10$	W4
$10 < u_{10}$	W5

4. táblázat: Szélesebbességi osztályok

Napszak	Felhőzet (okta)	Stabilitási osztály
nappal	0–2	S1
nappal	3–5	S2
nappal	6–8	S3
éjszaka	8–5	S4
éjszaka	4–0	S5

5. táblázat: Stabilitási osztályok (labilistól a stabilisig) a napszak (nappal - éjszaka) és a felhőzet (okta) függvényében

6. A zajtérképekhez szükséges meteorológiai preprocesszor

6.1. Elméleti háttér

A zajtérképek elkészítéséhez a meteorológia az adott helyre jellemző hangsebességi profilok megadásával, tipizálásával, és előfordulási valószínűségeik meghatározásával járul hozzá. Ehhez ismernünk kell a referenciaszint órás adatait:

- szélsébség, szélirány (10 m-es szint, 10 perces átlagérték),
- hőmérséklet, relatív nedvesség (2 m-es szint),
- felhőzet (okta).

A terjedési számítás fontos kiegészítő információi pl.:

- légnyomás,
- felszíni hőmérséklet,
- a felszín típusa, borítottsága,
- a felszín állapota (pl. nedves vagy száraz),
- a hóborítottság (ha releváns).

Ez utóbbi jellemzőket a meteorológiai preprocesszor első változatában nem vettük figyelembe. „Nem kéri” a CNOSSOS-EU „módszertan” (Defrance et al., 2007).

A szabványmódszernél a légköri stabilitást a hőmérséklet (T), a napszak és a felhőzet alapján határozzuk meg. Ha rendelkezésre állnak a felszínközeli réteg turbulencia paraméterei

(impulzusáram (τ) és a szenzibilis hőáram (H), illetve a dinamikus sebesség (u^*) és a dinamikus hőmérséklet (T^*), illetve az ezekből számítható Monin–Obukhov-féle hossz (L_{Mon}), továbbá a felszínre jellemző érdességi magasság (z_0), akkor a hangsebesség profil már számolható a szélsébség (u) és a hőmérséklet (T) ismeretében, majd elvégezhető a profilok tipizálása a szélirány (Dir) ismeretében az egyes terjedési irányokra. Ilyen adatok rendelkezésre állnak pl. az ERA5 adatbázisból [9 – ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present]. A Monin–Obukhov-féle hasonlósági elméletről részletesebben ír: *Golder* (1972), *Stull* (1988), *Weidinger et al.*, 2000, *Arya* (2001), *Foken* (2017).

A meteorológiai gyakorlatban a szélirány azt mutatja, hogy honnan fúj a szél. Északi szél (N, 360°) esetén a levegő északról dél fele áramlik. Keleti szél (E, 90°), déli szél (S, 180°), illetve nyugati szél (W, 270°). Így nyugati szél esetén pl. az áramló levegő nyugatról keletre mozog. A hang terjedési iránya ezzel ellentétesen az az irány ahová a hang terjed, vagyis 180°-os eltérés van a meteorológiában és az akusztikában használt irányok között. Ahhoz, hogy a két tárgyalásmódot összehangoljuk, a zajforrások helyzetét változtatjuk egy receptor pont körül.

Ha egy mérőpontban arra vagyunk kíváncsiak, hogy az odaérkező hanghullámnak milyen a sebessége, akkor a hangterjedés iránya (a hangforrás és a mérőhely közötti egyenes) és az aktuális szélirány által bezárt szöget (φ) kell figyelembe venni (1. ábra). A hangsebesség profil általános alakját a felszíni hangsebesség, továbbá a magasság logaritmikus és lineáris változásától függő tag összegeként írjuk le. A logaritmikus tag az indifferens egyensúlyi helyzethez közeli szélsébség és hőmérsékleti profil hatását adja meg i) a dinamikus sebesség, ii) a dinamikus hőmérséklet, valamint iii) a hangterjedés iránya és az aktuális szélirány által bezárt szög (φ) értékén keresztül (7. egyenlet). A lineáris tagban a rétegződés (indifferenstől való eltérés) hatása jelenik meg. Mind az A , mind a B szorzótényezőben megjelenik a dinamikus sebesség és a dinamikus hőmérséklet, vagyis a mechanikus és a termikus turbulencia intenzitása, tudva, hogy a hátszél növeli, a szembeszél csökkenti a hang terjedési sebességét. A hangsebesség profil általános alakja (*Defrance et al.*, 2007):

$$c(z) = A \cdot \ln \left(1 + \frac{z}{z_0} \right) + B \cdot z + c(0), \quad (7)$$

ahol

z – a felszín (pontosabban a kiszorítási rétegvastagság) feletti magasság [m],

z_0 – érdességi magasság [m],

A – a logaritmikus tag szorzótényezője [m/s],

B – a lineáris tag szorzótényezője [1/s],

$c(0), c(z)$ – a hangsebesség [m/s] a felszínen, pontosabban a kiszorítási rétegvastagság szintjén, illetve a z magasságban.

Ez tehát egy „egyszerű” logaritmikus-lineáris profilközelítés, ami mind stabilis, mind labilis rétegződés esetén alkalmazható. A kérdés a megfelelő állandók megadása az egyes hangterjedési osztályok esetén. Megjegyezzük, hogy a mikrometeorológiában a turbulens áramszámítások esetén ennél bonyolultabb univerzális függvényeket használunk különösen instabil egyensúlyi helyzetekben (Weidinger *et al.*, 2000; Foken, 2017). A hangsebesség profilokat az A és B tényező jellemző értékei (intervallumai) szerint soroljuk osztályokba az egyes terjedési irányok szerint. A következőkben azzal a kérdéssel foglalkozunk, hogy mi a terjedési modell alkalmazásának meteorológiai feltételrendszere?

A CNOSSOS-EU két különböző meteorológiai állapotot – a zajterjedés szempontjából kedvezőt és kedvezőtlen – különböztet meg. A hosszú idejű átlagos zajszintet (L_{LT}) a zajterjedés szempontjából „kedvező” (L_F), illetve a zajterjedés szempontjából „kedvezőtlen” (L_H) esetre bontjuk a meteorológiai viszonyoktól függően. A hosszú idejű átlagos zajszintet (L_{LT}) a kedvező és a kedvezőtlen esetekhez tartozó hangnyomásszintek előfordulási arányával súlyozott logaritmikus összegeként számoljuk decibel (dB) értékekben, logaritmikus skálán.

$$L_{LT} = 10 \times \lg [p_f \cdot 10^{L_F/10} + (1 - p_f) \cdot 10^{L_H/10}] . \quad (8)$$

A fenti képletben:

L_F : a zajterjedés szempontjából „kedvező” (downward-refraction conditions, lefelé történő elhajlás) körülmények közötti zajszint,

L_H : a zajterjedés szempontjából „kedvezőtlen” (homogeneous conditions, ún. homogén) körülmények közötti zajszint. Ide számítódnak a magassággal csökkenő hangsebességi profilok és az indifferens egyensúlyi helyzetek (magassággal nem változó, állandó hangsebesség),

p_f : a zajterjedés szempontjából „kedvező” körülmények (a hangsebesség nő a magassággal) előfordulásának időaránya az év(ek)en belül, a nap három szakaszában: nappal, este és éjszaka,

$(1 - p_f)$: a zajterjedés szempontjából „kedvezőtlen” körülmények előfordulásának időaránya egy átlagos éven belül.

6.2. Bemenő adatok

A zajterhelés számítására alkalmazott alapösszefüggéseket a napszak (night – éjszaka, day – nappal, evening – este,) függvényében (L_{night} , L_{day} , $L_{evening}$) kell kiszámítani az egyes frekvencia-tartományokban pl. az ISO 1996-2:1987 szabványban közöltek alapján [10 – ISO 9613-2:1996 Acoustics]. Hosszabb időszakra vonatkoztatva az átlagos zajterhelés L_{den} , az egyes napszakokra (T_d , T_e , T_n) vonatkozó hosszú időszak (többéves) átlagában kapott L_{Aeq_day} , $L_{Aeq_evening}$, L_{Aeq_night} zajterhelés súlyozott átlaga. Ha átlagos napszak-hosszakkal dolgozunk, akkor hazánkra is alkalmazható a $T_d = 12$ óra, $T_e = 4$ óra és a $T_n = 8$ óra felosztás.

A fentiek alapján a napi átlagos zajterhelés értéke adott frekvenciatartományban:

$$L_{den} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{24} \left\{ T_d \cdot 10^{\frac{L_{Aeq_day}}{10}} + T_e \cdot 10^{\frac{L_{Aeq_evening}+5}{10}} + T_n \cdot 10^{\frac{L_{Aeq_night}+10}{10}} \right\} \right]. \quad (9)$$

Ha rendelkezésre állnak az órás meteorológiai adatokból számított stabilitási osztályhoz és napszakhoz tartozó valószínűségek, továbbá az egyes stabilitási osztályokra jellemző átlagos zajterhelési adatok, akkor az átlagos integrált zajterhelés (L) a következő munkaformula alapján számítható a 25 stabilitási kategóriát tartalmazó modellváltozatban:

$$L = 10 \cdot \lg \left[\sum_{m=1}^{25} \sum_{i=1}^3 p_{m,i} \cdot w_i \cdot 10^{\frac{L_{m,i} + \Delta L_a(t_{m,i}, RH_{m,i})}{10}} \right], \quad (10)$$

ahol

m – a stabilitási kategória, a mi esetünkben 1 és 25 közötti,

i – a napszak ($i = 1$, nappal, $i = 2$, este, $i = 3$, éjszaka),

$L_{m,i}$ – adott frekvencia tartományhoz tartozó zajterhelés a légköri abszorpció (elnyelés) nélkül az m -edik stabilitási kategóriában az adott napszakban,

$\Delta L_a(t_{m,i}, RH_{m,i})$ – a légköri abszorpció hatása az m -edik stabilitási osztályban az i -edik napszakban,

$t_{m,i}, RH_{m,i}$ – a hőmérséklet és a relatív nedvesség az adott stabilitási osztályban és az adott napszakban,

$p_{m,i}$ – az adott légköri stabilitási kategória (m) valószínűsége az adott (i) napszakban,

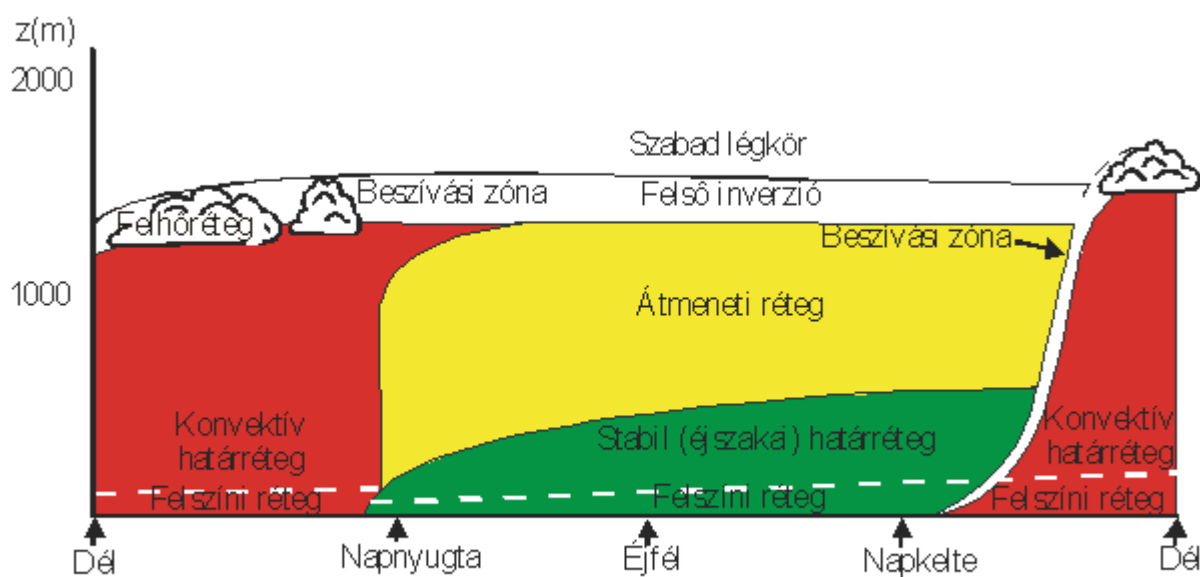
w_i – a napszaktól függő adaléktag a zajterjedés számításához (nappali értéke nulla, este és éjszaka 5 dB és 10 dB, illetve további forrástól függő korrekciós tagok $\hat{w}_i$ azaz a három

napszakra rendre: $\hat{w}_1 \cdot 10^0$, $\hat{w}_2 \cdot 10^{\frac{5}{10}}$, $\hat{w}_3 \cdot 10^{\frac{10}{10}}$.

6.3. A planetáris határréteg szerkezete, napi menete

A planetáris határréteg (PHR) a troposzféra alsó 0,1–3 km-es tartománya, melyet a felszín és a felszín által meghatározott termikus és mechanikus kényszerek közvetlenül befolyásolnak (Timár, 2017). E felszíni kényszerekre a határréteg órák, vagy ennél rövidebb időskálán reagál (Stull, 1988). Ez az emberi tevékenység színtere, itt helyezkedik el a szennyezőanyag-források többsége, valamint itt kezdődik és fejeződik be a szennyezőanyagok légköri forgalma. Itt történik a zajterjedés, e réteg ismerete (profilok, turbulencia) fontos a zajterjedés modellezésben, pl. a repülőtéri zaj esetében.

Mechanikai turbulencia létrejöhet a felszíni sűrűlódásból adódó szélnyírás, vagy alacsonyszintű jet hatására. Termikus turbulencia a besugárzás hatására, a térben és időben eltérő módon felmelegedő felszín miatt jön létre a nappali órákban. Az intenzív besugárzás következtében instabil rétegződés alakul ki, ami feláramlást eredményez. A határréteg tetején elhelyezkedő felhők kisugárzása miatti hűtőhatás viszont leáramláshoz vezet, ami szintén keveredést jelent (Stull, 1988; Timár, 2017). A PHR szerkezetét, jellegzetes napi menetét az 5. ábra mutatja.



5. ábra: A planetáris határréteg szerkezete, napi menete (Stull, 1988 alapján).

A PHR magassága függ az évszaktól, a napszaktól és az éppen fennálló szinoptikus helyzetűől, a domborzati viszonyoktól és a felszín érdességétől (Ács *et al.*, 2014; Mona *et al.*, 2016). Tengerfelszínek felett a víz jelentős hőkapacitása, s így a kismértékű hőingás hatására a planetáris határrétegnek nincs markáns napi menete. Szárazföldek felett azonban – főként a

nyári anticiklonális helyzetben, amikor a be- és kisugárzás jórészt zavartalanul zajlik – a PHR jellegzetes napi menettel rendelkezik (5. ábra) (Arya, 2001; Timár, 2017).

A nappali vagy konvektív határréteg vastagságát elsősorban a hőszállítás intenzitása határozza meg. A konvekció felhőmentes esetben napfelkelte után kb. fél órával indul meg, és energia-utánpótlását a naplementét megelőző órákban veszi el. A konvektív PHR vastagsága 1–3 km, a konvektív felszínközeli rétegé pedig akár 100–200 m (hozzávetőlegesen a PHR 10%-a).

Az indifferenshez közeli átmeneti planetáris határréteg (vagy átmeneti keveredési réteg) napnyugta környékén fejlődik ki. A termikképződés napnyugta előtt kb. fél-másfél órával leáll. „Nem lesz utánpótlása” a konvektív örvényeknek, a turbulens átkeveredés jelentősen gyengülni kezd. Ha nincs erőteljes advekciónak hatása, a határréteg képes megőrizni a nap folyamán felvett tulajdonságait (vertikális profilok, koncentrációk). Az átmeneti réteg, az éjszakai stabil határréteg miatt, a talajjal nem áll kapcsolatban és közel változatlan állapotban fennmaradhat mindaddig, amíg a következő nap konvektív határrétege eléri és emelkedése során lassan felemészti az átmeneti réteget (de Haij et al., 2007, Timár, 2017).

Az este folyamán az átmeneti réteg alja a felszínnel való kölcsönhatás eredményeként stabilis réteggé alakul. Felépül a stabil éjszakai határréteg. Ennek jellemzője a gyenge, szórványos turbulencia, illetve a gravitációs hullámok keltette örvények. Gyengül a felszíni szél, a felsőbb szinteken viszont szuper-geosztrofikussá válik. Kialakulhat az ún. éjszakai vagy alacsony szintű jet. A hidrosztatikailag stabilis levegő elnyomja, míg a kifejlődő éjszakai jet szélnyírása elősegíti a turbulenciát. A PHR alsó 10%-a az állandó fluxusokkal jellemzett felszínközeli réteg.

6.4. Hangsebesség-profilok

Korábban már bemutattuk a logaritmikus lineáris közelítéssel felírt hangterjedési profilok alakját, ami a Monin–Obukhov-féle hasonlósági elmélet egyszerűsített változata. A hangsebességi profil logaritmikus tagjában a dinamikus sebesség (u_*) és a dinamikus hőmérséklet (T_*) hatását látjuk. Ez indifferens profilközelítést (a magassággal logaritmikusan változó hőmérsékleti és szélesebbégi adaléktagot) jelent, figyelembe véve a becsült ($u_* \cdot \cos(\varphi)$) és (T_*) előjelét. A lineáris tag a szélesebbégi és a hőmérsékleti profilegyenlet logaritmiktól való eltérését modellezi a stabilitás függvényében. Nem használja a

szabványmódszer a labilis rétegződésre jellemző hatványkitevős univerzális függvényeket. Itt egyszerűségekre törekedtek a fejlesztők (Defrance et al., 2007).

A hangsebesség változása a stabilitás, az érdességi magasság és a felszínfeletti magasság függvényében: a NORD2000 szabványmódszerben a hang terjedési sebessége a felszín feletti z magasságban a (7) egyenletben már bemutatott

$$c(z) = A \cdot \ln\left(1 + \frac{z}{z_0}\right) + B \cdot z + c(0) \quad (11)$$

összefüggéssel írható le a felszínközeli réteg turbulencia karakterisztikáinak ismeretében. A $c(0)$ értékét a $z = 0$ szintre jellemző hőmérséklet és nedvesség értékek megadásával számítjuk, amelyeket a 2 m-es szint adataiból származtatunk a felszínközeli réteg turbulencia paramétereinek ismeretében, ha nem állnak rendelkezésre közvetlen mérési adatok a felszínen (1 egyenlet). A standard számolásnál 10 cm-es érdességi magassággal dolgozunk. Első közelítésként a felszínre jellemző hangsebesség helyett számolhatunk a standard meteorológiai mérések alapján a 2 m-es szintre vonatkozó hangsebességgel. Számunkra a hangsebesség magasságszerinti változása, gradiense a fontos.

A stabilitást közvetett módon, az A és B változók segítségével vesszük figyelembe az egyes stabilitási kategóriákhoz tartozó dinamikus sebesség (u_*), dinamikus hőmérséklet (T_*) és a Monin–Obukhov-féle hossz (L_{Mon}) ismeretében. Az A és B változó értékei a napszak (nappal többségében labilis, éjszaka stabilis rétegződés) függvényében a következő összefüggések adják meg (Eurasto, 2006; Defrance et al., 2007):

– nappal (S1, S2 és S3) stabilitási osztály:

$$A = \frac{u_* \cdot \cos(\varphi)}{\kappa} + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c(0)}{T_{ref}}\right) \cdot \left(0,74 \cdot \frac{T_*}{\kappa}\right), \quad (12)$$

$$B = \frac{u_* \cdot \cos(\varphi)}{\kappa \cdot L_{Mon}} + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c(0)}{T_{ref}}\right) \cdot \left(0,74 \cdot \frac{T_*}{\kappa \cdot L_{Mon}} - \frac{g}{c_{pd}}\right), \quad (13)$$

– éjszaka (S4 és S5) stabilitási osztály:

$$A = \frac{u_* \cdot \cos(\varphi)}{\kappa} + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c(0)}{T_{ref}}\right) \cdot \left(0,74 \cdot \frac{T_*}{\kappa}\right), \quad (14)$$

$$B = 4,7 \cdot \frac{u_* \cdot \cos(\varphi)}{\kappa \cdot L_{Mon}} + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{c(0)}{T_{ref}} \right) \cdot \left(4,7 \cdot \frac{T_*}{\kappa \cdot L_{Mon}} - \frac{g}{c_{pd}} \right). \quad (15)$$

A képletekben szereplő változók és állandók, a szokásos jelölések szerint rendre:

u_* – dinamikus sebesség, értékét a 10 m-es szint szélesebbesége alapján (W1–W5 osztály) a 6. táblázat tartalmazza,

T_* – dinamikus hőmérséklet, értékét a 10 m-es szint szélesebbesége (W1–W5 osztály) és a stabilitási osztály (S1–S5 osztály) alapján a 7. táblázat tartalmazza (5 x 5 adat),

L_{Mon} – Monin–Obukhov-féle hossz, ami a dinamikus sebesség (u_*) és a dinamikus hőmérséklet (T_*) ismertében adható meg. Karakterisztikus értékeinek reciprokát a szélesebbeségi és a stabilitási osztályok függvényében a 8. táblázat tartalmazza.

κ – von Kármán-konstans, értéke 0,4,

g – nehézségi gyorsulás, értéke 9,81 m/s²,

c_{pd} – a száraz levegő állandó nyomáson vett fajhője, értéke 1005 J/kg K,

T_{ref} – referencia, vagy felszíni hőmérséklet $T(z = 0)$,

$c(0)$ – a felszínen mért adiabatikus hangsebesség,

φ – szélirány és a hangterjedés iránya közötti szög.

Mivel rendelkezésre állnak a hőmérséklet, légnyomás és a relatív nedvesség értékek, a hőmérséklet helyett virtuális hőmérséklettel számolunk.

Szélesebbeségi osztály	u_* [m/s]
W1	0,00
W2	0,13
W3	0,30
W4	0,53
W5	0,87

6. táblázat: A dinamikus sebesség karakterisztikus értéke az egyes sebességi osztályokban.

Szélsebességi osztály	Stabilitási osztály				
	S1	S2	S3	S4	S5
W1	−0,4	−0,2	0,0	+0,2	+0,3
W2	−0,2	−0,1	0,0	+0,1	+0,2
W3	−0,1	−0,05	0,0	+0,05	+0,1
W4	−0,05	0,0	0,0	0,0	+0,05
W5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

7. táblázat: A dinamikus hőmérséklet (T^* , K) karakterisztikus értéke az egyes sebességi osztályokban a légköri stabilitási osztályok függvényében.

Szélsebességi osztály	Stabilitási osztály				
	S1	S2	S3	S4	S5
W1	−0,08	−0,05	0,0	+0,04	+0,06
W2	−0,05	−0,02	0,0	+0,02	+0,04
W3	−0,02	−0,01	0,0	+0,01	+0,02
W4	−0,01	0,0	0,0	0,0	+0,01
W5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

8. táblázat: A Monin–Obukhov-féle hossz inverzének ($1/L_{\text{Mon}}$, $1/m$) karakterisztikus értéke az egyes sebességi osztályokban (W1–W5) a légköri stabilitási osztályok (S1–S5) függvényében

- Ha rendelkezésre állnak a hőmérsékleti és nedvességi adatok, meg tudjuk határozni a referencia szint hangsebességét a hangterjedés egyenletéből (1). Ha nem állnak rendelkezésre ilyen adatok, akkor Defrance et al. (2007) szabványmódszere alapján a 9. táblázatban közölt referencia hőmérsékleti értékeket használjuk $c(0)$ hangsebesség kiszámításakor.

Stabilitási osztály				
S1	S2	S3	S4	S5
+15 °C	+15 °C	+15 °C	+5 °C	+5 °C

9. táblázat: a felszíni referencia hőmérséklet (T_{ref} , °C) értéke a referencia módszerben a légköri stabilitási osztályok (S1–S5) függvényében (Defrance et al., 2007).

- Ha rendelkezésre állnak az órás meteorológiai adatok és vannak turbulens árammérések, akkor közvetlenül számítható a hangsebesség profilja, illetve megadható az egyes stabilitási kategóriákhoz és szélirányokhoz tartozó turbulencia paraméterek átlagos értéke és szükség szerint statisztikai eloszlása is. E célra alkalmas az ERA5 reanalízis adatbázis is.

Az órás adatok alapján előállítjuk a hangsebesség profil A és B paraméterét adott φ szögre vonatkozóan (óránként 36 eset), majd besoroljuk a megfelelő stabilitási osztályba. A folytonos változókból ismét diszkrét értékeket, 5–5 kategóriát, azaz 5–5 értéket képzünk a 10. és a 11. táblázatban bemutatottak szerint ($A_1, \dots, A_5$ és $B_1, \dots, B_5$).

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
Intervallum	$-\infty < B \leq -0,08$	$-0,08 < B \leq -0,02$	$-0,02 < B \leq 0,02$	$0,08 < B \leq 0,02$	$0,08 < B \leq \infty$
Érték	-0,12	-0,04	0	0,04	0,12

10. táblázat: reprezentatív B értékek. A lineáris profil paraméter (B , 1/s) stabilitási és a szélviszonyoktól (ellenszél, kereszt szél, hátszél) való függése (labilitástól a stabilitásig)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Intervallum	$-\infty < A \leq -0,7$	$-0,7 < A \leq -0,2$	$-0,2 < A \leq 0,2$	$0,2 < A \leq 0,7$	$0,7 < A \leq \infty$
Érték	-1,0	-0,4	0	0,4	1,0

11. táblázat: reprezentatív A értékek. A logaritmusos profil paraméter (A , m/s) stabilitási és a szélviszonyoktól (ellenszél, kereszt szél, hátszél) való függése (labilitástól a stabilitásig)

A számítások során a virtuális hőmérséklettel dolgozunk. Referencia szintnek a 2 m-es szintet választottuk. Ide határozzuk meg a hangsebesség értékeit. A felszín és a 2 m-es szint között természetesen lehet akár 2 °C-os hőmérséklet-eltérés is erősen stabilis, vagy labilis esetben, de ez a hangsebesség becslésénél legfeljebb néhány tized százalékos eltérés jelent (a hőmérséklet fizikai egysége a Kelvin).

A nappali és az éjszakai órákat a globálsugárzás parametrizációján keresztül határozzuk meg (*Holtstlag and van Ulden*, 1983). A parametrizáció Kárpát-medencei alkalmazhatóságát *Popov et al.* (2021) igazolta. A 20 W/m² feletti globálsugárzással jellemzett órákat tekintettük nappali óráknak ($G > 20 \text{ W/m}^2$). Derült ég esetén a globálsugárzást (G_0), napmagasság (ϕ) ismeretében számoljuk adott földrajzi helyen, adott órában, csillagászati földrajzi ismeretek alapján.

$$G_0 = 990 \cdot \sin\phi - 30. \quad (16)$$

Ezt követi a felhőzet hatásának egyszerű leírása. Itt N a felhőzet mennyisége nyolcadokban.

$$G = G_0 \cdot (1 + 0.75 \cdot N^{3,4}). \quad (17)$$

Hónap:			Napszak						
No	A (m/s)	B (1/s)	360° Észak	10°	20°	...	330°	340°	350°
1	-1,00	-0,12							
2	-1,00	-0,04							
3	-1,00	0,00							
4	-1,00	0,04							
5	-1,00	0,12							
6	-0,40	-0,12							
7	-0,40	-0,04							
8	-0,40	0,00							
9	-0,40	0,04							
10	-0,40	0,12							
11	0,00	-0,12							
12	0,00	-0,04							
13	0,00	0,00							
14	0,00	0,04							
15	0,00	0,12							
16	0,40	-0,12							
17	0,40	-0,04							
18	0,40	0,00							
19	0,40	0,04							
20	0,40	0,12							
21	1,00	-0,12							
22	1,00	-0,04							
23	1,00	0,00							
24	1,00	0,04							
25	1,00	0,12							
SUM (%)			100,0	100,0	100,0	...	100,0	100,0	100,0

12. táblázat: A stabilitástól, a szélesebségtől és a szélrózsától függő, a receptor pont irányába történő hangterjedési gyakoriságok irány szerinti eloszlása az egyes napszakokban. Az A és B változók szélesebség (ellenszél ... kereszt szél ... hátszél, jellemzően az A változó) és a stabilitás szerinti eloszlása (erősen labilistól az indifferensen át a stabilisig, jellemzően a B változó). (Lásd Defrance et al., 2007).

(Ha a zajforrás helyzete pl. 0 fok, akkor északi szél esetén (lásd az 1. ábrát is) a receptor pontnál teljes hátszél lesz, hiszen a zajforráshoz képest a receptor pont most délre lesz.)

6.5. Valószínűségi kategóriák a forrás és a receptor pont helyzetétől függően

Most már el lehet készíteni a stabilitási osztály–napszak–forrás-receptor irány táblázatokat tetszőleges időszakra: adott hónapra, évszakra, adott évre, vagy hosszabb átlagolási idővel, több év adatait felhasználva (12. táblázat az előző oldalon). Ehhez meg kell adni az egyes órákban a szélesebbesség, szélirány és a virtuális hőmérséklet értékeit és a stabilitási kategóriát, a többit a „program számolja”.

A magyarországi módszerfejlesztés 5–10 éves időszakra vonatkozó átlagos évi statisztikai feldolgozásokat várt a K + F + I projekt keretében az ország különböző térségeire. Alapként, 10 éves referencia adatállományként, a pestszentlőrinci (12843) állomás adatait használtuk.

A receptor pont körül képzeletben 36 zajforrást helyeztünk el egymástól 10 fokos távolságban (1. ábra, 12. táblázat). Minden órára megadjuk a szélirány, a szélesebbesség és stabilitás függvényében az egyes zajforrásokra jellemző A és B értékeket, vagyis megnézzük, hogy az zajforrások milyen hangsebesség profil kategóriába esnek. Ha nagy a szélesebbesség akkor előfordul mind erős hátszél és szembeszél, mind közepes erősségű hátszél és szembeszél, s természetesen keresztzél esetén a 0 szélesebbességi kategória is. Gyenge szél esetén a szélvektor és a receptor pont egymáshoz képesti helyzetétől függetlenül minden esetben (minden receptor irányban) gyenge szél lesz.

A 25 kategória esetszámainak ismeretében már csak az a feladatunk, hogy szétválasszuk a magassággal növekvő (kedvező zajterjedés) és a magassággal csökkenő vagy állandó hangsebességi profilokat. Ehhez a (11) egyenletet kell deriválnunk.

$$\frac{\partial c}{\partial z} = A \cdot \frac{1}{z+z_0} + B. \quad (18)$$

A hangsebesség magasságszerinti változása nem feltétlenül szigorúan monoton. A szabványmódszerben, ahogy korábban már említettük $z = 4$ m, $z_0 = 0,1$ m standard értékeket használunk. Így már el tudjuk dönteni, hogy az adott kategória (adott A és Adott B érték) a zajterjedés szempontjából kedvező $\frac{\partial c}{\partial z} > 0$, vagy kedvezőtlen $\frac{\partial c}{\partial z} \leq 0$.

7. Eredmények

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) órás szinoptikus mérési adatait a Meteomanz, illetve az Ogimet internetes oldalakról töltöttük le olyan évekre, amikor rendelkezésre álltak a felhőzeti adatok. Ez a szűk keresztmetszet. A felhőzet mennyiségét oktában (0, 1, ..., 8), az ég nyolcadaiban adják meg. A budapesti adatokat a pestszentlőrinci Marczell György Főobszervatóriumában (12843) végzett órás észlelések alapján elemezzük a 2014–2018-as 5 éves, illetve 2009–2018-as 10 éves időszakokra. További 5 szinoptikus állomás adatsorát is feldolgoztuk, hogy képet kapjunk az országon belüli különbségekről. Ezek a mérőhelyek: Siófok, Pécs, Kecskemét, Szeged és Miskolc.

A letöltött órás SYNOP táviratokat egy feldolgozó programmal rendszerezzük (Excel makrók, Visual Basic for Applications programnyelvben [11 – *Excel programozás*]). Vizsgáljuk az OM SZ szabadon elérhető adatbázisainak az alkalmazását is, ami 2021-ben még nem volt elérhető [12 – *OM SZ Meteorológiai adattár*].

Kutatásunk során elsődleges feladatunk az adatsorok feldolgozása, elemzése és kiértékelése volt. Elvégeztük a Budapesthez tartozó mérési adatbázisok minőségbiztosítását, a hiányzó adatok pótlását. Rövid adathiányok (legfeljebb 6 mérési ciklus kimaradása) esetén lineáris interpolációt alkalmaztunk, míg az ennél hosszabb adathiányok esetén az előző és az adathiányt követő 1–3 nap adatai alapján végeztük el a hiánypótlást, legfeljebb 3 órás igazodási időt hagyva a mért és az interpolált adatok illesztésére. Átlagos napi meneteket állítottunk elő. Az évek többségében 0,5–1,5% alatti adathiánnyal számolhattunk.

A Meteomanz oldalról kb. 20 évre visszamenőleg tölthetjük le az állomási adatokat. Ki tudunk választani olyan sokéves időszakokat, amikor hazánkban jelentős számban voltak észlelővel ellátott állomások (10–20 darab), s rendelkezésre álltak a zajterhelés számítások meteorológiai preprocesszorához szükséges felhőzeti adatok is. Abban az esetben, ha az éjszakai órákban nem voltak felhőészlelések, a hiányzó adatokat a legutolsó esti, illetve a legkorábbi reggeli felhőészlelés felhasználásával lineáris interpoláció alkalmazásával határoztam meg. E program elkészítése is a feladataim közé tartozott.

A 6. ábrán példaként bemutatom az előfeldolgozás után rendezett órás meteorológiai adatállományon végzett első részszámítás Excel eredménytábláját. Itt a mérési adatok és a leszármaztatott mennyiségek szerepelnek a meteorológiában szokásos jelölések szerint. C például a hangsebesség értéke, dimenziója [m/s] (V oszlop az ábrán).

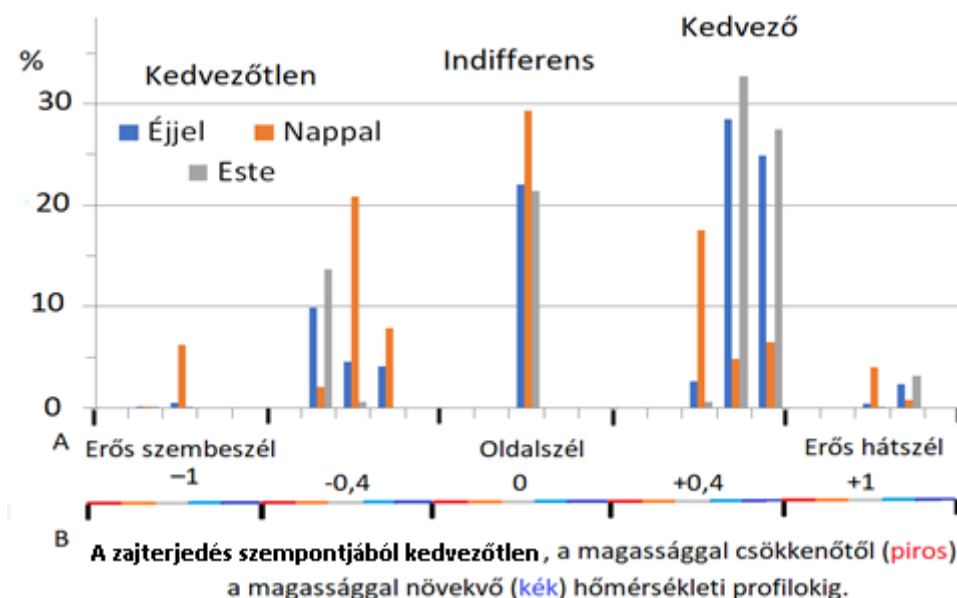
Az adatok futtatása után megkapjuk 3 táblázatba (tehát: nappal, este és éjszaka) a hangterjedési gyakoriságok eloszlását a 25 stabilitási osztályra mind a 36 virtuális zajforrásra vonatkozóan a közepén levő receptorponttól nézve. A 12. táblázat fejlécében szereplő szögek az adott virtuális zajforrás helyzetét mutatják, s megadják, hogy az onnan induló és a receptor pontba jutó zajhoz milyen gyakorisági értékek tartoznak a 25-ös stabilitási kategóriák szerint. A táblázat adataiból kördiagramokat készítettünk. A 25 kategóriát úgy értjük, hogy minden A változóhoz tartozik egy B változó. Tehát például a 7. ábrán láthatjuk, hogy az első öt kategóriában (itt B változik) az A értéke -1 , a második öt kategóriáé $-0,4$ és így tovább (lásd a 12. táblázatot).

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
2	Ev	Ho	Nap	Óra UTC	DOY	Óra CET	időszak	fm	Rh	u	bld	N	Globálisugrás	W - szélesség osztály	5 - stabilitási osztály	Úcs	Tcs	L	Tv	e	q	C	
3	2018	1	1	0	1	1	1	1.8	97	2	120	0.25	0.0	2	4	0.13	0.1	0.02	275.7	6.7	4.2	332.8	
4	2018	1	1	1	1	1	2	1.4	99	2	100	0.375	0.0	2	4	0.13	0.1	0.02	275.2	6.7	4.2	332.6	
5	2018	1	1	2	1	1	3	1	2	100	3	110	0.5	0.0	2	4	0.13	0.1	0.02	275.9	7.1	4.4	332.9
6	2018	1	1	3	1	1	4	1	1.9	99	1	90	0.5	0.0	1	4	0	0.2	0.04	275.8	6.9	4.3	332.9
7	2018	1	1	4	1	1	5	1	1.7	99	2	40	0.875	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	275.6	6.8	4.3	332.7
8	2018	1	1	5	1	1	6	1	0.3	99	2	50	0.875	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	274.1	6.2	3.9	331.9
9	2018	1	1	6	1	1	7	2	0.8	99	2	60	0.875	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	274.6	6.4	4.0	332.2
10	2018	1	1	7	1	1	8	2	1.3	97	2	30	1	5.3	2	5	0.13	0.2	0.04	275.1	6.5	4.1	332.5
11	2018	1	1	8	1	1	9	2	1.6	97	2	30	1	35.8	2	3	0.13	0	0	275.4	6.7	4.2	332.7
12	2018	1	1	9	1	1	10	2	2.2	97	2	70	1	58.4	2	3	0.13	0	0	276.1	6.9	4.4	333.1
13	2018	1	1	10	1	1	11	2	2.8	95	2	10	1	71.6	2	3	0.13	0	0	276.7	7.1	4.4	333.4
14	2018	1	1	11	1	1	12	2	3.4	93	2	360	0.875	156.2	2	3	0.13	0	0	277.3	7.3	4.5	333.8
15	2018	1	1	12	1	1	13	2	4.5	88	2	350	0.875	140.5	2	3	0.13	0	0	278.4	7.4	4.6	334.5
16	2018	1	1	13	1	1	14	2	5	88	2	360	0.875	103.9	2	3	0.13	0	0	278.6	7.5	4.7	334.6
17	2018	1	1	14	1	1	15	2	4.7	88	1	340	0.875	48.9	1	3	0	0	0	278.6	7.5	4.7	334.6
18	2018	1	1	15	1	1	16	2	4.9	88	2	320	0.875	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	278.9	7.6	4.8	334.7
19	2018	1	1	16	1	1	17	2	4.4	93	1	330	0.75	0.0	1	5	0	0.3	0.06	278.4	7.8	4.9	334.4
20	2018	1	1	17	1	1	18	2	3.9	93	1	30	0.75	0.0	1	5	0	0.3	0.06	277.8	7.5	4.7	334.1
21	2018	1	1	18	1	1	19	3	3.1	95	1	120	0.75	0.0	1	5	0	0.3	0.06	277.0	7.3	4.6	333.6
22	2018	1	1	19	1	1	20	3	2	97	2	90	0.625	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	275.9	6.8	4.3	332.9
23	2018	1	1	20	1	1	21	3	2.3	99	1	240	0.875	0.0	1	5	0	0.3	0.06	276.2	7.1	4.5	333.1
24	2018	1	1	21	1	1	22	3	2.6	100	2	80	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.5	7.4	4.6	333.3
25	2018	1	1	22	1	1	23	1	2.6	99	2	90	0.875	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.5	7.3	4.6	333.3
26	2018	1	1	23	1	1	24	1	2.7	99	2	60	0.875	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.6	7.3	4.6	333.4
27	2018	1	2	0	2	1	1	1	3	99	2	10	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.9	7.5	4.7	333.6
28	2018	1	2	1	2	1	2	1	2.7	97	2	10	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.6	7.2	4.5	333.4
29	2018	1	2	2	2	2	3	1	2.8	97	2	10	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.7	7.2	4.6	333.4
30	2018	1	2	3	2	2	4	1	2.8	97	2	30	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.7	7.2	4.6	333.4
31	2018	1	2	4	2	2	5	1	2.8	97	2	30	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.7	7.2	4.6	333.4
32	2018	1	2	5	2	2	6	1	2.8	97	2	80	1	0.0	2	5	0.13	0.2	0.04	276.7	7.2	4.6	333.4
33	2018	1	2	6	2	2	7	2	2.8	99	1	320	1	0.0	1	5	0	0.3	0.06	276.7	7.4	4.7	333.5
34	2018	1	2	7	2	2	8	2	2.8	100	1	90	1	5.4	1	5	0	0.3	0.06	276.7	7.5	4.7	333.5
35	2018	1	2	8	2	2	9	2	3.5	99	2	320	1	35.9	2	3	0.13	0	0	277.5	7.8	4.9	333.9
36	2018	1	2	9	2	2	10	2	4.1	97	2	320	1	58.6	2	3	0.13	0	0	278.1	7.9	5.0	334.3
37	2018	1	2	10	2	2	11	2	4.9	93	2	320	0.875	150.6	2	3	0.13	0	0	278.9	8.1	5.1	334.8
38	2018	1	2	11	2	2	12	2	5	91	3	330	0.875	157.0	2	3	0.13	0	0	279.0	7.9	5.0	334.8
39	2018	1	2	12	2	2	13	2	5.5	88	2	320	0.875	141.4	2	3	0.13	0	0	279.5	8.0	5.0	335.1

6. ábra: Budapesti órás szinoptikus adatokkal végzett egyik részszámítás eredménytáblája.

7.1. Valószínűségi eloszlások, hangsebesség-profil típusok, napszakos gyakoriságok

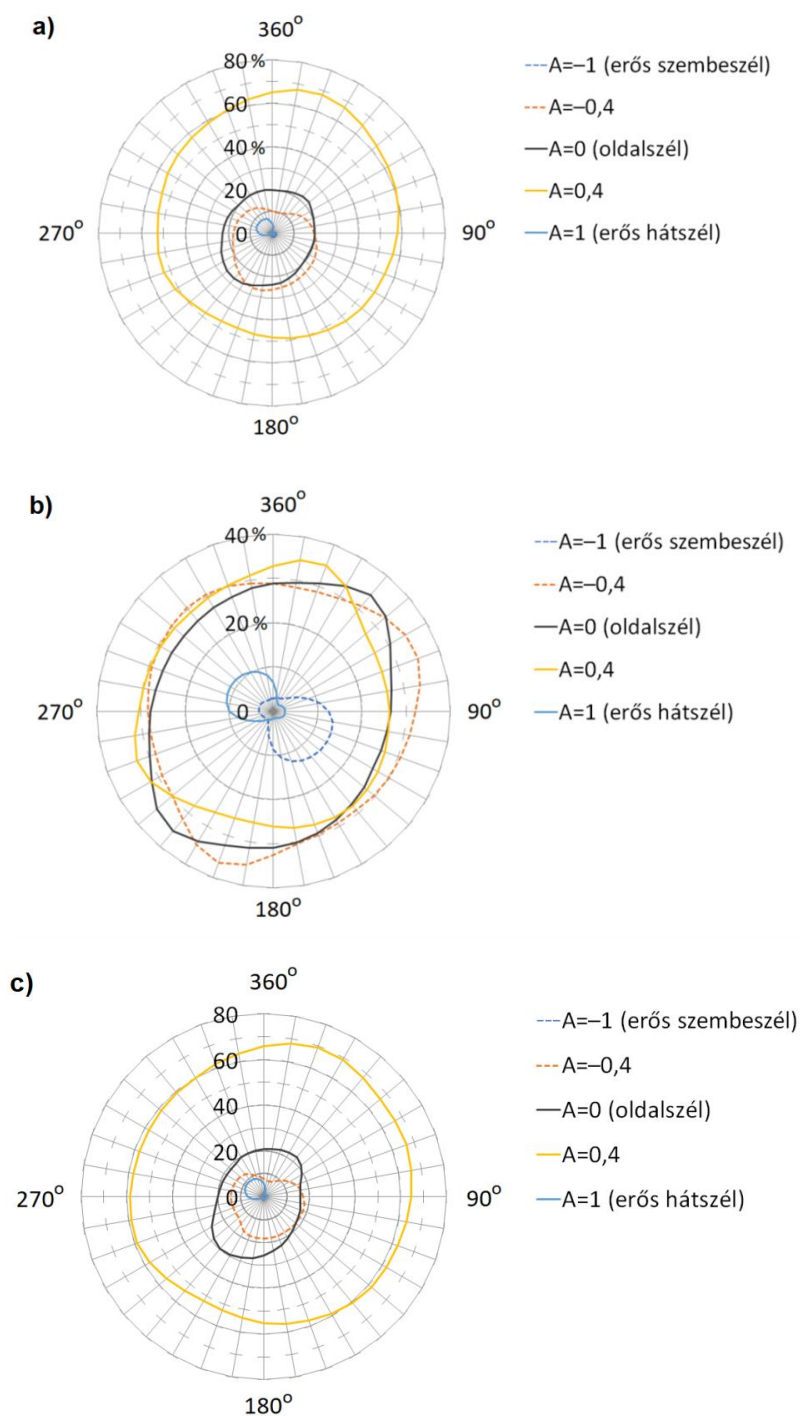
A következőkben Fritz et al. (2021) és Weidinger et al. (2022.a, b) munkájára támaszkodva elemzem a számítási eredményeket. A 10 éves budapesti adatsor feldolgozása alapján a nappali, 06–18 óra között az esetek ~34%-ában volt a zajterjedés szempontjából kedvező időszak. Ez a többségében stabilis esti, 18–22 óra közötti és az éjszakai, 22–06 óra közötti időszakokra rendre ~59% és ~64%-ra nőtt. Meglepően sok az indifferens ($A = 0$, $B = 0$) hangsebességi profil, ami a napszaktól és a receptor pont irányától függően 15–35%, emiatt ajánlasként megfogalmazható egy harmadik, kvázi-indifferens profilkategória bevezetése. A teljes adatállományra vonatkoztatva a napszaktól függően 20–30% közötti.



7. ábra: A zajterjedés relatív (%-os) gyakorisága a 25 stabilitási osztályban a pestszentlőrinci (12843) meteorológiai állomás órás adatai alapján (2009–2018) a nappali (06–18), az esti (18–22) és az éjszakai (22–06) órákban, helyi időben. A növekvő értékei a terjedés irányába eső szélsébség növekedéséről, a szélprofil szerkezetéről és az erősödő stabilitásról, míg B növekvő értékei a stabilitásról (labilistól a stabilis rétegződésig) és az aktuális szélprofilról tájékoztatnak.

Következő lépésként a 25 stabilitási kategória előfordulási gyakoriságait elemezzük (A_1 – A_5 és B_1 – B_5 állandók). Ehhez nyújt segítséget a 7. ábra. A hangsebesség magasságszerinti változását (gradiensét) a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft szakembereivel egyeztetve $z = 4$ m-es szinten számítottuk, az érdességi magasságot 10 cm-nek választottuk.

A 25 lehetséges kategóriából mindössze 11-ben van esetszám. Ez érthető, hiszen pl. nagy szélsébségek ($> \sim 4$ – 6 m/s) nem fejlődhet ki erősen labilis rétegződés, indifferenshez közeli rétegződés alakul ki. Nappali órákban nagyobb valószínűséggel találkozunk kedvezőtlen zajterjedési helyzetekkel, míg az esti és az éjszakai órákban többségében a hangsebesség nő a magassággal (a zajterjedés szempontjából kedvező helyzet). A hangsebesség gradiensét elsődlegesen A előjele határozza meg.



8. ábra: A ábrák középpontjában levő receptor ponthoz képest 10 fokonként (10° – 360°) elhelyezett zajforrásokra vonatkozó %-os gyakorisági értékek az A változó 5 kategóriájára. A negatív A értékek a zajterjedés szempontjából alapvetően kedvezőtlen, míg a pozitív értékek kedvező eseteket jelzik. $A = 0$ adja meg az indifferens rétegződések %-os gyakoriságát. Az éjszakai órák (22–06) eredményeit a felső (8.a), a nappali órákra (06–18) vonatkozó eredményeket a középső (8.b), míg az esti órákra (18–22) vonatkozót az alsó (8.c) ábra adja meg Budapestre (12843) a 2009 és 2018 közötti 10 évre.

Következő lépésként megnézzük, hogy az egyes napszakokban milyen valószínűséggel fordulnak elő a zajterjedés szempontjából kedvező és kedvezőtlen helyzetek a stabilitástól, a zajforráshoz viszonyított széliránytól (szembeszéltől az oldalszáron át, a hátszélig) és szélsébségtől függő helyzetekben (8. ábra). Természetesen szélcsendes esetekben „nincs turbulencia”, A értéke nulla. A virtuális zajforrásokat 10 fokként helyeztük el (1. ábra). A receptor pont a „szélrózsa közepén” van. Így adott szélirány esetén, minden órában lesz olyan zajforrás, amire vonatkozólag a receptor pont éppen szélirányban van (hátszél) és olyan virtuális zajforrás, ami a receptor ponttól nézve szembeszeles helyzetet jelent. Természetesen találkozunk két olyan virtuális zajforrással is, amire vonatkoztatva a receptor ponttól nézve teljes oldalszél lesz (1. ábra).

A 8.a ábra az éjszakai órákra kapott eredményeket szemlélteti. A várakozásnak megfelelően, többségben vannak a stabil (inverziós) helyzetek, amikor a hőmérséklettel együtt a hangsebesség is nő a magassággal. Az erős hátszél kedvező zajterjedést jelent. Ilyen helyzetek a fő (ÉNY) szélirányban elhelyezkedő zajforrások esetén a leggyakoribbak, de értékük egyik évben sem haladja meg átlagosan az 5%-ot. Ezt mutatja az $A = 1$ értékhez tartozó esetszámok eloszlása. Természetesen ahány erős hátszeles esettel találkozunk, annyi szembeszeles helyzetünk is lesz. A két eloszlás azonban nem szimmetrikus, hiszen ott van a hőmérsékleti rétegződés, ami „irány-független”. A szembeszél a zajterjedés szempontjából kedvezőtlen környezeti feltételt jelent, míg a magassággal növekvő hőmérsékleti profil ezzel ellentétes hatást mutat. (Nem szimmetrikus az $A = 1$ és az $A = -1$ értékhez tartozó irány szerinti eloszlás-görbe.) A nagy szélsébséggel rendelkező szembeszeles helyzetben a magassággal növekvő inverziós rétegződés gátolja a szembeszél hatását. Itt $A = -1$, a maximális gyakoriság mindössze 2% körüli, míg a fent elemzett az $A = 1$ esetén ez 7% volt.

Leggyakoribb a gyenge hátszéllal rendelkező stabilis helyzet (8.a ábra), a forrás elhelyezkedésétől függően 50–70% közötti valószínűséggel, ami kedvező zajterjedési helyzeteket jelent. Ilyenekkel legnagyobb valószínűséggel a receptor ponttól észak-északkeleti irányban elhelyezkedő zajforrások esetén találkozunk. Megjegyezzük, hogy a gyenge hátszél lehet kis széles helyzet, amikor a zajforrás felől fúj a szél, illetve olyan nagy széles helyzet, amikor a szélzásló szöget zár be a zajforrás és a receptor egyenesével, s a szélvektor erre az egyenesre vonatkozó vetülete ($u \cdot \cos \varphi$) már kisebb lesz, mint az u szélsébség. Jelentős az indifferens rétegződés értéke is 20% körüli északkeleti és délnyugati maximummal, ami többségében oldalszeles helyzet.

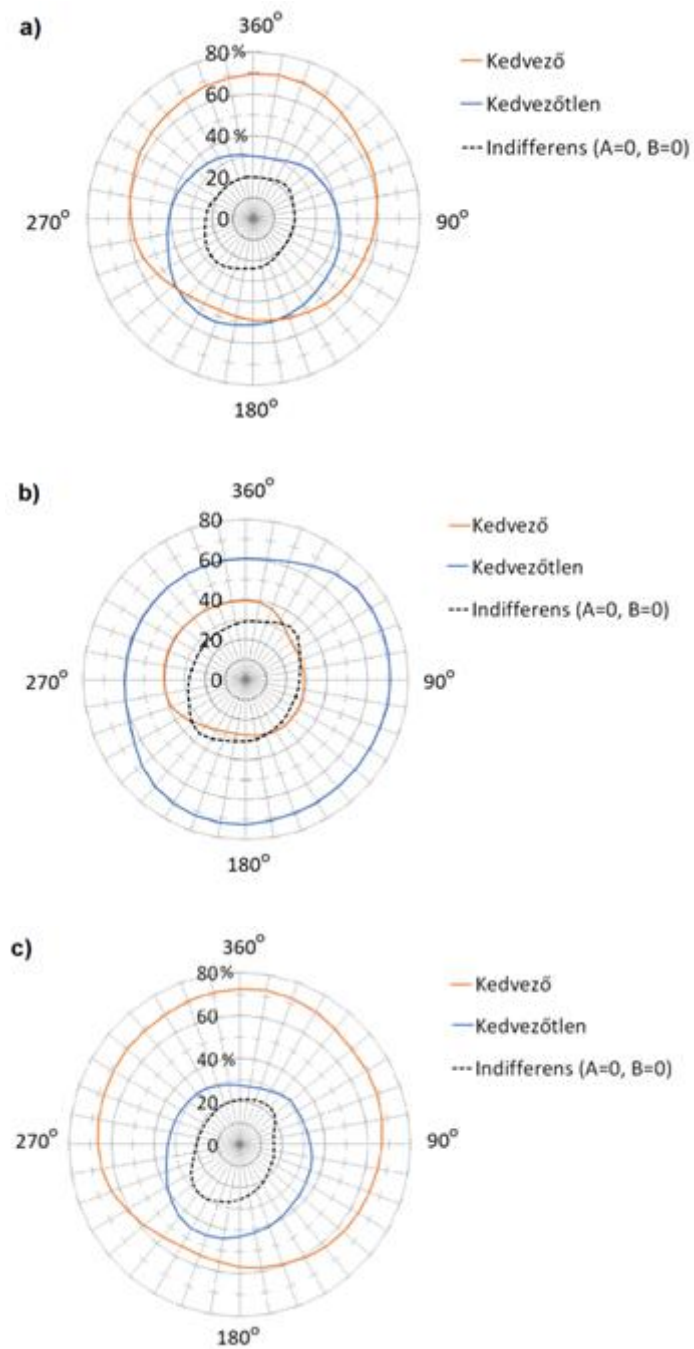
A nappali órákban (8.b ábra) megnőtt a környezeti zajterjedés szempontjából kedvezőtlen esetek száma. A szembeszeles helyzetek inkább kedvezőtlen, míg a hátszeles helyzetek kedvező zajterjedés kialakulásához vezetnek. A fő szélirány, ahogy említettük, a pestszentlőrinci állomáson az északnyugati. Az aszimmetriát a nappali hőmérsékleti rétegződés okozza. Ilyenkor a hőmérséklet és így a hangsebesség is nyugvó közegben csökken a magassággal. Most nagyobb számban találjuk az $A = -1$ értékhez tartozó esetszámokat, mint az $A = +1$ értékhez kapcsolódókat. A maximális értékek 15% körüliek. A várakozásoknak megfelelően a szembeszeles helyzetekben a legnagyobb valószínűséget akkor találjuk, ha a zajforrás délkeleti irányban van a receptor ponthoz képest, ami ellentétes a fő széliránnyal, míg hátszeles esetben, ami a zajterjedésre kedvező a legnagyobb valószínűséget akkor kapjuk, amikor a zajforrás a leggyakoribb északnyugati szélirányban van (lásd a két kék görbét). A szembeszeles és hátszeles esetek irányok szerinti eloszlása szinte egymás tükörképe mind az erős, mind a mérsékelt szeles esetekben.

Az indifferens terjedési viszonyok maximumai itt is a fő szélirányra merőlegesen helyezkednek el; maximumuk északkeleti, illetve délnyugati zajforrás esetén van.

Az esti órákra (18–22) jellemző 8.c ábra az éjszakai órák (8.a ábra) sajátosságait követi. Erre az időszakra már az inverziós rétegződés kialakulása és a kis szélesebbességi értékek jellemzők.

Következő lépésként a kedvező ($100 \cdot p_f, \%$) és a kedvezőtlen ($(100 \cdot (1 - p_f), \%)$) zajterjedési viszonyokat elemezzük a három napszakban (9. ábra). Megadjuk az indifferens ($A = 0, B = 0$) helyzetek %-os gyakoriságát is. Kedvező helyzetek (jó zajterjedés) legnagyobb számban az északnyugat-északkeleti szektorban találhatók, míg a zajterjedés szempontjából kedvezőtlenek az ezzel ellentétes oldalon találhatók. (A „szélrózsánk” a virtuális zajforrások elhelyezkedése szerint mutatja a középpontban levő receptor pontra jutó esetek %-os gyakoriságát.) Itt is nagy az indifferens esetek előfordulási valószínűsége: a nappali órákban a fő szélirányra merőleges értéke meghaladja a 35%-ot. Jól látható a nappali órákban a kedvező és a kedvezőtlen helyzetek várakozásnak megfelelő aszimmetrikus eloszlása is. Az esti és az éjszakai órákban kisebb az eltérés az egyes irányok gyakoriságai között, mint a nappali órákban.

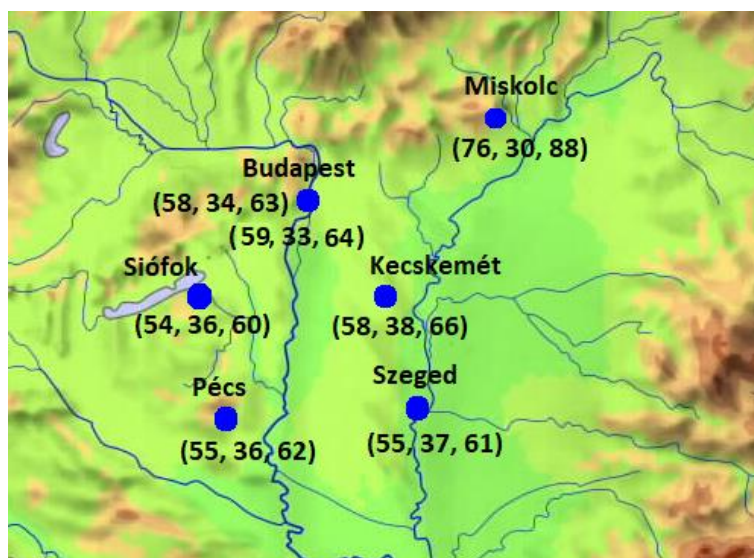
Ismét megjegyezzük, hogy a **zajterjedés szempontjából kedvező** helyzetek a **zajszenyezés szempontjából kedvezőtlenek** (lefelé történő elhajlás, nem alakul ki árnyékszóna, $\frac{\partial c}{\partial z} > 0$).



9. ábra: A zajterjedés szempontjából kedvező ($\partial c/\partial z > 0$) és kedvezőtlen esetek ($\partial c/\partial z \leq 0$), illetve külön kiemelve a kedvezőtlen esetekben szereplő indifferens rétegződés ($\partial c/\partial z = 0$) %-os gyakoriságai a középben levő receptor pont körül 10 fokon-ként (10° – 360°) elhelyezett zajforrásokra vonatkozóan különböző napszakokban 2009–2018 közötti 10 évre a pestszentlőrinci (12843) meteorológiai állomás órás adatai alapján. Az éjszakai órák (22–06) eredményeit a felső (9.a), a nappali órákra (06–18) vonatkozót a középső (9.b), míg az esti órákra (18–22) vonatkozót az alsó (9.c) ábra adja meg.

Az egyes irányokhoz tartozó éves gyakorisági értékek szórásai 1–5% közöttiek a 2009–2018-as 10 éves adatsor alapján. Itt nincs értelme relatív szórásokról beszélni, hiszen minden irányra a kedvező és a kedvezőtlen helyzetek százalékos gyakoriságainak az összege 100%, s csak két kategóriánk van.

A fentiekben elemzett 10 éves budapesti adatsor mellett további 5 magyarországi SYNOP állomás 2014–2018 közötti órás adatai alapján is elemeztük a zajterjedés szempontjából kedvező esetek (p_f) átlagos relatív gyakoriságait mindhárom napszakban (10. ábra). A két 5 éves budapesti időszakra vonatkozó éjszakai és nappali az p_f értékek közötti eltérés mindhárom esetben kisebb 2%-nál. Az 5 éves időszakokon belüli szórás 1% alatti a déli órákban, de nem haladja meg a 2%-ot a másik két napszakban sem. Így elég 5 éves adatsorokkal dolgozni.



10. ábra: A zajterjedés szempontjából kedvező esetek (p_f , %) relatív gyakorisága két budapesti 5 éves időszakra (2009–2013, felül) és 2014–2018, alul), valamint további 5 magyarországi városra 2014–2018 közötti 5 évre. A zárójelbe tett értékek az éjszakai (22–06) a nappali (06–18) és az esti (18–22) órákra vonatkozó értékeket adják meg.

A fővárosi és az 5 vidéki város Miskolc kivételével hasonló jellegzetességeket mutat. Az 5 éves átlagokban néhány %-os (<5%) eltérések mutatkoznak. Miskolc esti és éjszakai p_f értékei azonban markánsan, akár több mint 20%-kal meghaladják a többi állomás adatait. Sok a kedvezőtlen eset! Az állomás egy völgyben a városon kívül helyezkedik el. A magyarázó okok között első helyen szerepel a kis szélesség. Az itteni 1,5 m/s körüli átlagérték alig fele a

magyarországi átlagot jellemző 2,5–3,5 m/s-nak. A nappali órákban viszont nincsenek nagy különbségek más állomásokhoz képest.

A részletes elemzések azonban még hátra vannak. Szintén most folynak az ERA5 reanalízis adatbázisra alapuló futtatások. Érdemes országos kitekintésben értelmezni a meteorológiai adatokat. Fontosak lesznek a rácsponti adatbázisok is, s nem feledkezhetünk meg a Kárpát-medencei kitekintésről, illetve a preprocesszor készítésénél alkalmazott profilszámítási módszertan érzékenységi vizsgálatairól sem, de ez már a 2023-as év feladata.

8. Összefoglalás

Módszert dolgoztunk ki a CNOSSOS-EU zajterjedési modell meteorológiai preprocesszorának előállítására a kedvező és a kedvezőtlen zajterjedési helyzetek napszak és zajforrás-irány szerinti szétválasztására. Elvégeztük az adatok minőségbiztosítását és a hiányzó kisszámú óraértékek pótlását. A képzeletbeli receptor pont körül 10 fokonként helyeztünk el virtuális zajforrást (minden órában 36 eset). Főbb megállapításaink a budapesti adatsor feldolgozása során a következők:

- Erős szembeszeles ($A = -1$) és hátszeles esetek ($A = +1$) legnagyobb számban a fő szélirányokban (ÉNY, DK) fordulnak elő, míg a kis szeles ($A = \pm 0,4$) esetek ezekhez képest általában 30–60 fokkal eltérnek, míg az oldalszeles ($A = 0$) esetek a fő szélirányra merőleges irányokban a leggyakoribbak.
- Nagyszeles esetek nappal fordulnak elő nagyobb számban.
- A szembeszeles és hátszeles esetek irányok szerinti eloszlása szinte egymás tükörképe.
- *A legtöbb, a zajterjedés szempontjából kedvező helyzet, a vártnak megfelelően, este és éjszaka fordul elő az esetek közel 2/3-ában, nappal az esetek közel 1/3-ában.*

Öt további hazai SYNOP állomás adatainak elemzéséből kitűnik a lokális hatások fontossága. A kis szélsébséggel reprezentált miskolci állomás nem adott reprezentatív eredményeket. A többi állomás között alig voltak eltérések. Az egyes évek között kicsi a p_f valószínűségi értékek változékonysága.

További terveink közé tartozik még, hogy vizsgálatainkat kiterjesszük egész Magyarországra, s egy felhasználóbarát lekérdezési rendszert alakítsunk ki.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, dr. Weidinger Tamásnak, aki mindig motivált, és segített a dolgozat elkészítésében. Köszönöm az állandó figyelmét és segítségét.

Irodalomjegyzék

- Arya, S.P., 2001: Introduction to Micrometeorology. Academic Press, San Diego, 415 p. ISBN-012-059354-8
- Attenborough, K., 2014: Sound Propagation in the Atmosphere. Chapter 4 in Springer Handbook of Acoustics, 41 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-0755-7_4.
- Ács, F., Gyöngyösi, A.Z., Breuer, H., Horváth, Á., Mona, T., Rajkai, K., 2014: Sensitivity of WRF-simulated planetary boundary layer height to land cover and soil changes. Meteorologische Zeitschrift 23(3), 279–293. DOI 10.1127/0941-2948/2014/0544
- Bailey, D.T., Schewe, D.B., Touma, J.S., 1995: User's guide for the industrial source complex (isc3) dispersion models. Volume II U.S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711 pp. 14–110.
- Bihari P., 2007: Energetikai eredetű levegőkörnyezetterhelés értékelése és tervezése. Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, Energetikai gépek és rendszerek Tanszék, Budapest (témavezető: Gács I.). 52 p.
- Bite P., Pálffy M., 2016: A közlekedési zaj figyelembevételének szabályai, számítása és a zaj csillapításának módjai. 1. Közüti közlekedési zaj. Magyar Mérnöki Kamara. 91 oldal. <http://fmmk.hu/kozlekedes/wp-content/uploads/2016/08/A-K%C3%96ZLEKED%C3%89SI-ZAJ-FIGYELEMBEV%C3%89TELe.pdf>
- da Silva, J.L.G., 2017: Computational sound propagation models: An analysis of the models NORD2000, CONCAWE, and ISO 9613-2 for sound propagation from a wind farm. Uppsala University Department of Earth Sciences, Campus Gotland, 61 p. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1150045/FULLTEXT01.pdf>
- Davenport, A.G., Grimmond, C.S., Oke, T.R., Wieringa, J., 2000: Estimating the roughness of cities and sheltered country, in 'Proceedings of 12th Conference of Applied Climatology, American Meteorological Society, pp. 96–99. https://ams.confex.com/ams/May2000/techprogram/paper_13744.htm
- de Haij, M., Wauben, W., Baltink, H.K., 2007: Continuous mixing layer height determination using the LD-40 ceilometer: a feasibility study. KNMI, De Bilt, Netherlands.
- Defrance, J., Salomons, E., Noordhoek, I., Heimann, D., Plovsing, B., Watts, G., Jonasson, H., Zhang, X., Premat, E., Schmich, I., Aballea, F., Baulac, M., de Roo, F., 2007: Outdoor Sound Propagation Reference Model Developed in the European Harmonise Project. Acta Acustica united with Acustica, 93, 213–227.
- Domokos E., Horváth B. (szerkesztők), 2011: Zaj- és rezgésvédelem. Környezetmérnöki Tudástár, 13. kötet, Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet, Veszprém, 294 oldal. https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/13-Zaj-rezges_vedelem.pdf
- Domokos E., Somogyi V., Yuzhakova, T., Lakó J., 2014: Levegőtisztaság-védelem és klímakutatás. Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet. https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0089_03_klimakutatas/ch09s02.html
- Eurasto, R., 2006: NORD2000 for road traffic noise prediction WP4. Weather classes and statistics Research Report, VTT Technical Research Centre of Finland 25 p. No. VTT-R-02530-06 7.4.2006
- Fritz P., Gyöngyösi A.Z., Gandhi, A., Mendyl, A., Tordai Á., Weidinger T., 2021: A meteorológiai információk szerepe a zajterhelés modellezésében. V. Orvosmeteorológiai Konferencia. <http://www.mettars.hu/v-orvosmeteorologiai-konferencia/>.
- Foken, T., 2017: Micrometeorology. Second Edition, Springer Nature. 379 p. ISBN 978-3-642-25440-6 (eBook) DOI 10.1007/978-3-642-25440-6
- Garrett, S.L. (2020) Reflection, Transmission, and Refraction. In: Understanding Acoustics. Graduate Texts in Physics. Springer.
- Golder, D., 1972: Relations among stability parameters in the surface layer, Boundary-Layer Meteorology 3, 47–58. <https://doi.org/10.1007/BF00769106>

- Götz G., Rákóczi F. 1981: A dinamikus meteorológia alapjai. Tankönyvkiadó, 483. oldal. ISBN: 9631755800
- Hammer, M.S., Swinburn, T.K., Neitzel, R.L., 2014: Environmental Noise Pollution in the United States: Developing an Effective Public Health Response. *Environmental Health Perspectives*, 122(2), 115–119. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1307272>
- Holtzlag, B., van Ulden, A., 1983: A Simple Scheme for Daytime Estimates of the Surface Fluxes from Routine Weather Data. *Journal of Applied Meteorology*, 22, 517-529. DOI:10.1175/1520-0450(1983)022<0517:ASSFDE>2.0.CO;2
- Hunter, C.H., 2012: A Recommended Pasquill-Gifford Stability Classification Method for Safety Basis atmospheric Dispersion Modeling at SRS. Savannah River National Laboratory, 15 p. SRNL-STI-2012-00055
- Irányelvek, 2015: A Bizottság (EU) 2015/996 Irányelve (2015. május 19.) a 2002/49/EK európai parlamenti és tanácsi irányelv szerinti közös zajértékelési módszerek meghatározásáról. Az Európai Unió Hivatalos Lapja 2015.7.1. L 168, 1–823. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0996&from=IT>
- Junge, J., Westerhellweg, A., 2011: Estimation of Zero Plane Displacement Heights in the Vicinity of a Forest. Retrieved from http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/publications/Publikations/S05_3.pdf
- Kiss Á., Tasnádi P., 2012: Környezetfizika. Typotex Kiadó, 304 oldal. ISBN 978-963-279-540-9 http://etananyag.ttk.elte.hu/FiLeS/downloads/EJ-Kiss-Tasnadi_Kornyezetfizika.pdf
- Kiss N., 2010: A stratégiai zajtérképezés hazai tapasztalatai. Diplomamunka, ELTE TTK Környezettudomány szak, 52 oldal. <https://edit.elte.hu/xmlui/bitstream/handle/10831/37763/KissNora.pdf>
- Maijala, P., Kokkonen, J., Kontkanen, O., 2016: CNOSSOS-EU Sensitivity to Meteorological and to Some Road Initial Value Changes. *Inter-Noise 2016*, Hamburg, Germany, 1367–1378.
- Mona T., Ács F., Horváth Á., 2016: Jellegzetes PHR-magasság napi menetek a Kárpát-medence nyári időszakában. *Meteorológiai Tudományos Napok 2016 (Poszter)* https://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2016/P08_MonaT.pdf
- NCHRP Rresearch Report 882, 2018: How Weather Affects the Noise You Hear from Highways. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25226>
- NORD2000, 2006: NORD2000 for road traffic noise prediction. WP4. Weather classes and statistics. VTT Raimo Eurasto Espoo 7.4.2006. 25 p.
- Nummelin, M., Poikolainen, E., 2017: CNOSSOS-EU- Laskentamalli – Laskenta-asetukset ja mallinnusperiaatteet Liikenneviraston ohjeita 4/2017. Liikennevirasto Helsinki 2017, 59 p.
- Padilla-Ortiz, A.L., Machuca-Tzili, F.A., Ibarra-Zarate, D., 2022: Smartphones, a tool for noise monitoring and noise mapping: an overview. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04240-6>
- Parászka V., 2020: Vasúti zaj- és rezgésvédelem EU irányelvei, stratégiai zajtérképezés. Közlekedéstudományi Egyesület. 2020. június 23. <https://www.ktenet.hu/uploads/Paraszka%20Viola-KTE%20eloadas.pdf>
- Popov, Z., Nagy, Z., Baranka, Gy, Weidinger, T., 2021: Assessments of Solar, Thermal and Net Irradiance from Simple Solar Geometry and Routine Meteorological Measurements in the Pannonian Basin. *Atmosphere*, 12(8), 10.3390/atmos12080935
- Stull, R.B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publisher, 667 p. ISBN 978-94-009-3027-8

- Szepesi, D., 1981: A levegőkörnyezet levegőminőség és humánkomfort tervezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 201 oldal. ISBN: 9631037819
- Szűcs J., 2014: Település levegőkörnyezetének állapotvizsgálata terjedési modell és matematikai statisztikai módszerek alkalmazásával (városi esettanulmány). Doktori (PhD) értekezés, Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Kar Földtudományok Doktori Iskola, 133 oldal.
- Timár Á., 2017: A keveredési réteg magasságának meghatározása felhőalap-mérők visszaszóródási időszoraiból. Diplomamunka, ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék, Budapest, (témavezetők: Szabó Z.A., Sebők I., belső konzulens Weidinger T.). 59 p.
- Unger J., Sümeghy Z., Kántor N., Gulyás Á., 2012: A felszínközeli légréteg klimatikus folyamatai. In: Kisléptékű környezeti klimatológia. Szegedi Egyetemi Kiadó, Szeged. 40 p. ISBN 978–963–315–068–9
- VDI, 1988: VDI 2563:1988-08 - Draft Noise components of vehicles; measurement and assessment. German title: Geräuschanteile von Straßenfahrzeugen; Meßtechnische Erfassung und Bewertung. Publication date: 1988-08
- Weidinger, T., Fritz, P., Gandhi, A., Mendyl, A., Tordai, Á., 2022.a: Surface layer's sound speed profiles: climatological analysis and application for the CNOSSOS-EU noise model. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'22) 2022, Budapest / Hungary, Proceeding, 473480. ISBN 978-963-421-881-4
- Weidinger T., Fritz P., Tordai Á.V., Gandhi, A., Mendyl, A., 2022.b: A zajterjedés szempontjából „kedvező” körülmények éven belüli átlagos előfordulásának elemzése hazánk különböző régióira. sokéves meteorológiai állomási adatok alapján. Tanulmány a Közlekedéstudományi Intézet (KTI) megbízásából, 74 oldal.
- Weidinger T., Parászká V., Balogh E., Fritz P., Gandhi, A., Mendyl, A., Tordai Á.V., 2022.c: A CNOSSOS-EU újgenerációs zajterjedési modell felépítése és meteorológiai adatháttere. 48. Meteorológiai Tudományos Napok, 2022. november 17-18. Életterünk a légkör. Megfigyelés, modellezés, előrejelzés. MTA Nagyterem. Az előadások összefoglalói, 13. oldal. https://www.met.hu/omsz/rendezvenyek/index.php?id=3224&hir=48._Meteorologiai_Tudomanyos_Napok_%E2%80%93_2022
- Weidinger, T., Pinto, J., Horvath, L., 2000: Effects of uncertainties in universal functions, roughness length, and displacement height on the calculation of surface layer fluxes. Meteorologische Zeitschrift, 3, 139–154.
- Wenzel, G., Bleeg, J., Tilman, F., Marco J. M., 2013: Impact of Atmospheric Stability on Wind Energy Predictions. Brazil wind power annual conference. Retrieved from: <http://www.brazilwindpower.org/archives/anuario/Sala%201%20-%202015h45%20-%20Impact%20of%20Atmospheric%20Stability%20on%20Wind%20Energy%20Predictions.pdf>

Internetes források

- [1 – Európai Környezetvédelmi Ügynökség]
<https://www.eea.europa.eu/hu/articles/a-zajszennyez-es-jelentos-problema-mind>
- [2 – I.7. Zajterhelés, Budapest Környezeti Állapotértékelése 2019–2020.]
https://budapest.hu/Documents/BKAE/2019-2020/17_BK%C3%81%C3%89-2020_I-7-Zaj.pdf.
- [3 – 2002, Magyar szabvány. MSZ 15036]
http://www.magasbakony.hu/Val/Hangterjedes_a_szabadban_MSZ15036.pdf
- [4 – Basic Meteorological Process]
<http://www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAP1/NEWMET.htm>
- [5 – Műszaki háttér-dokumentáció a stratégiai zajtérképekre épülő intézkedési tervek készítéséhez]
<http://www.hermanottointezet.hu/sites/default/files/003.pdf>
- [6 – Stratégiai zajtérkép és intézkedési terv, 2013]
<https://www.erd.hu/pfile/file?path=/Binarisok-regi/2016/zajterkep-es-intezkedesi-terv->
- [7 – Intézkedési terv, Halásztelek Város, 2018]
<https://halasztelek.net/phocadownload/muszaki-iroda/zajterkep-2019.pdf>
- [8 – Segédlet a stratégiai zajtérképekre épülő intézkedési tervek készítéséhez]
Herman Ottó Intézet. 13 oldal. <http://www.hermanottointezet.hu/sites/default/files/000.pdf>
- [9 – ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present]
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- [10 – ISO 9613-2:1996 Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation]
<https://www.iso.org/standard/20649.html>
- [11 – Excel programozás]
http://www.sze.hu/~pusztai/Excel_prog.pdf
- [12 – OMSZ Meteorológiai adattár]
<https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/adattar/>