MŰEGYETEM 1782

Lángstabilitás akusztikai vizsgálata

Novotni Gergely István

Tudományos Diákköri Konferencia

Témavezető: Józsa Viktor

A DOLGOZAT AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTÉRIUMA ÚNKP-16-2-II. KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

2016

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés és célkitűzés 1
2. Irodalmi áttekintés 2
2.1. A hang 2
2.2. Égési zaj és –instabilitás 4
2.3. A perdület-paraméter és a lángalak 8
3. A mérőrendszer és a vizsgálati módszerek bemutatása 10
3.1. A mérési összeállítás és a mérés menete 10
3.2. Mintavételezés, adatfeldolgozás, hibaszámítás 12
4. Az eredmények kiértékelése 16
4.1. A lángalak hatása a zajra 16
4.2. A porlasztónyomás és a diffúzor hatása 25
4.3. Stabilitási térképek 28
5. Összefoglalás és továbblépési lehetőségek 31
6. Forrásjegyzék 33
7. Függelék 34

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Napjaink emissziós követelményeinek teljesítéséhez a hagyományosan alkalmazott diffúz lángok már nem megfelelőek. A nagyobb légfeleslegű, előkevert lángok kapcsán azonban felerősödött az akusztikai hatások által indukált égési instabilitások jelensége. Ez a tudományterület a hétköznapi gyakorlatban alkalmazott berendezésekkel csupán az elmúlt néhány évtizedben foglalkozott.

A dolgozatom célja, hogy egy előkeveréses, perdítőelemes, folyadéktüzelésű égővel végzett kísérletsorozat során rögzített zaj egyenértékű hangnyomásszintjét elemezzem a különböző üzemi paraméterek függvényében. A tüzelőberendezésekben az akusztikai instabilitás mindig több tényező eredője. A célom, hogy magának a lángnak a zajáról többet tudjunk meg, hogy a kiinduló folyamattal jobban tisztában legyünk.

A mérés során 6 különböző konstrukciós kialakítás, 6 eltérő porlasztónyomásán áll rendelkezésre hangfelvétel. Minden porlasztónyomáson 6-11 mérési pont volt felvéve a láng stabilitási tartományától függően. Így összesen több száz állapotban tudtam meghatározni az egyenértékű hangnyomásszintek átlagát és oszcillációját, számos különböző üzemi paraméter (pl. égéslevegő térfogatáram, perdület-paraméter, porlasztónyomás) kombináció esetében.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A hang

A hang a vivőközeg (levegő, víz, stb.) állapotának elemi ingadozása, amely hullám formában terjed. A hang által keltett közegelmozdulás, sebesség, sűrűség- és nyomásingadozás olyan kicsi, hogy mérésük nehézségekbe ütközik. Műszaki szempontból a nyomás mérhető a legegyszerűbben, mikrofonnal. A nyomásingadozást azért nevezzük eleminek, mert a légköri, nagyjából 10^5 Pa nyomáshoz képest a hallásküszöbünk (az a hang, amit még éppen meghallunk) kb. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa körül van, a 20 Pa-os érték pedig már fizikai fájdalmat okoz [1].

A hallható hangok tartománya nagyon széles skálát ölel fel nem csak a frekvenciák, hanem a nyomásingadozás tekintetében is. Ahogy említettem, az éppen hallható hang és a fájdalomküszöb között 10^6 nagyságrendű eltérés van. Emiatt az akusztikai jellemzőket logaritmikus skálán ábrázoljuk, méghozzá úgy, hogy a vizsgált értéket egy szabványban rögzített referencia értékhez viszonyítjuk. Mivel a hallásküszöb $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, ezért a hangnyomás esetén ez lett a viszonyítási alap. Amikor egy akusztikai mennyiség nagyságát ezen a logaritmikus skálán ábrázoljuk, szintekről beszélünk. A hangnyomásszint számítására szolgáló összefüggés a következő:

$$L_p = 10 \cdot log_{10} \left(\frac{p(t)}{p_{ref}} \right)^2 = 20 \cdot log_{10} \frac{p(t)}{p_{ref}} \tag{2.1}$$

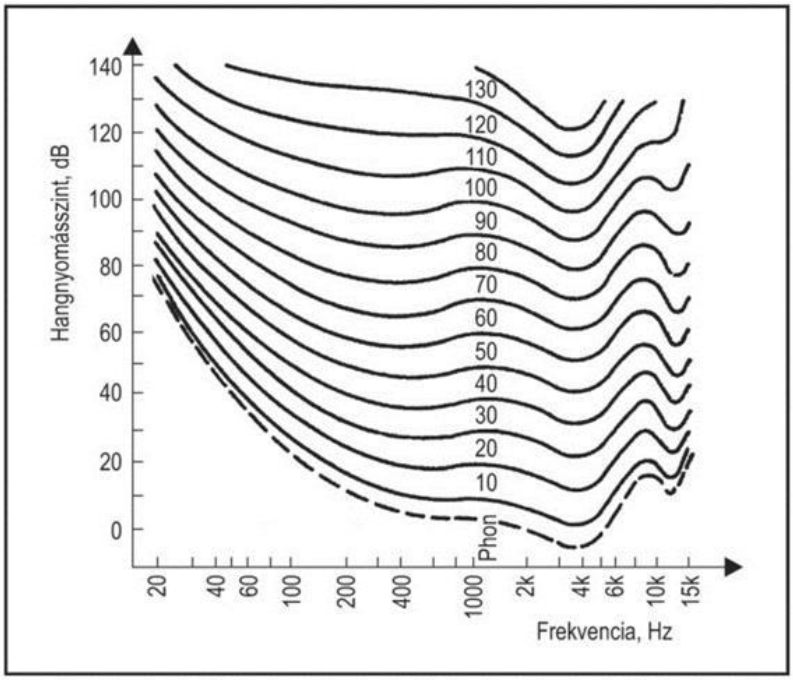
A képletben, $p(t)$ a hangnyomás [Pa], p_{ref} pedig a referencia hangnyomás ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa). A kifejezésből adódik, hogy 0 dB mindig a referencia érték, 20 dB 10-szeres, 40 dB 100-szoros eltérést jelent. (Természetesen a negatív értékek annyit tesznek, hogy a referenciaértéknél kisebb a vizsgált hang hangnyomása.) [2]

A hangnyomás annak a jellemzésére szolgál, hogy a tér egy adott pontjában milyen mértékű zavarást okoz a forrás, így számít a távolság, a levegőben való veszteség és zárt tér esetén a szoba jellemzői [2]. Ha mikrofonnal hangot veszünk fel, akkor bizonyos mintavételi frekvenciával és átlagolási idővel dolgozva úgynevezett egyenértékű hangnyomásszintet állít elő számunkra, mely azt jelenti, hogy az adott idő alatt mért ingadozó hangnyomásszint mekkora hangnyomásszint értékkel helyettesíthető.

Fontos megjegyezni, hogy a hangnyomásszintek feldolgozása során tekintettel kell lennünk rá, hogy logaritmikus a skála. A dolgozatban a hangnyomásszintek átlagolását [3] alapján végeztem.

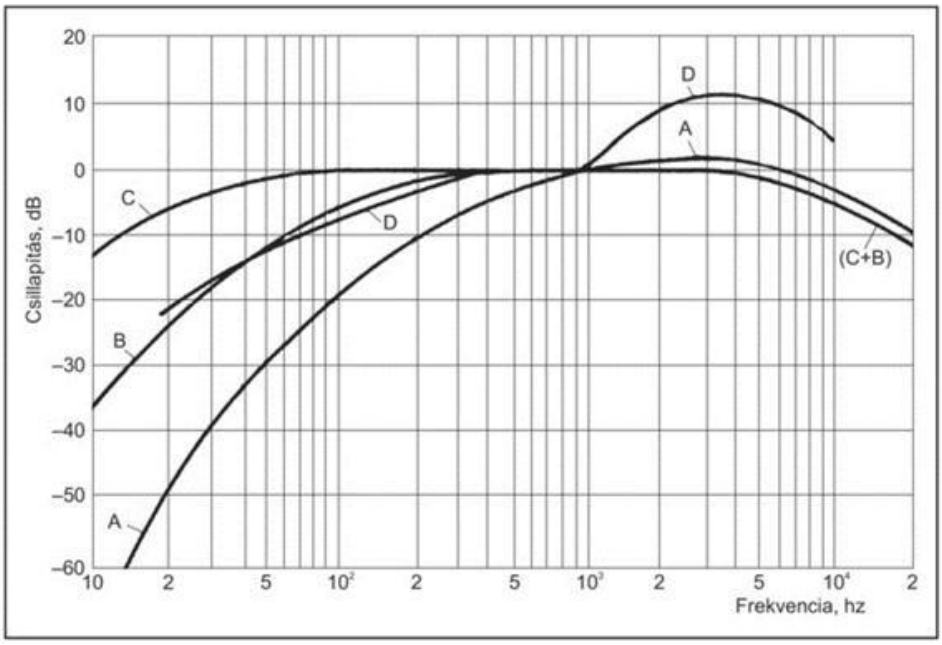
A hangfelvételek készítésekor szűrőket alkalmazhatunk. Ezeket akkor szokták alkalmazni, amikor az emberi hallásra gyakorolt hatást kell jellemezni, mivel erre a célra nem alkalmas a hallható hangok frekvenciatartományában mért lineáris hangnyomásszint. A *2.1. ábra* az egyenlő hangosságszintek görbéit ábrázolja, ismertebb nevükön a phon-görbéket. A görbék kétfülű hallásra, az emberrel szemben érkező, szinuszos,

szabadtéri hanghullámokra vonatkoznak. A görbéket sok emberen végzett kísérletek alapján állapították meg. A szaggatott vonallal rajzolt görbe a hallásküszöbgörbe. Tetszés szerinti frekvenciájú és intenzitású hang hangosságszintje annyi phon, amennyi az azzal szubjektíven azonosan hangosnak ítélt 1000 Hz-es tiszta hang hangnyomásszintje, dB-ben. A hallószerv érzékenysége az egészen magas és a mély hangok felé jelentősen csökken, de a csökkenés mértéke függ az intenzitástól is, a görbék nagyobb hangnyomásszintek esetén laposabbak lesznek [4].



2.1. ábra. Phon-görbék.

A zaj emberre gyakorolt hatásának jellemzésére szabványosan az A-hangnyomásszintet alkalmazzuk. Az A-hangnyomásszint a hangnyomásszint-mérőkbe beépített A-szűrővel mért hangnyomásszint [4]. A *2.2. ábra* a különböző szűrők csillapítását mutatja a frekvencia függvényében. A dolgozatban az A szűrővel felvett értékeket, illetve az úgynevezett Z szűrős értékeket elemzem. A Z szűrő igazából a szűrő nélküli esetet jelenti, és mivel mi a hang fizikai hatására is kíváncsiak vagyunk, ezért erre is szükségünk van. A különböző szűrők decibel értékeit Z és A szűrő esetén rendre dBZ-vel és dBA-val jelölöm.



2.2. ábra. Különböző szűrők csillapítása a frekvencia függvényében.

2.2. Égési zaj és –instabilitás

Áramló tüzelőanyag-levegő keverék égését mindig valamilyen hang kíséri. A hang egy szennyező, melyet az égési folyamat bocsát ki a kémiai, termodinamikai és áramlástani folyamatok eredményeképp. A kémiai szennyezőktől eltérően a hang azonnali hatást fejt ki azokra, akiket ér. A kibocsátás ideje alatt ingerültebbé tehet, csökkentheti a hatékonyságot és fiziológiai hatásai is lehetnek, adott esetben azonnali károsodást okozva. Az azonnali hatásokon túl hosszú távon károsíthatja a szerkezeteket és élettani károsodást okozhat. Alapvetően két különböző tudományterület foglalkozik a hangszennyezéssel és a kémiai szennyezőkkel. Mindazonáltal az égés által keletkezett zaj esetében ez a két terület átfedi egymást [5].

A tüzelőberendezésekben alapvetően két oka van a zaj keletkezésének. Egyrészt az ipari égőkben turbulens égés zajlik, másrészt hő szabadul fel. A turbulencia már önmagában hangot generál, mivel a kialakuló nyomásmező nem állandó. Az égési zaj a turbulencia és az égés kölcsönhatásából keletkezik[5].

Az égési zaj fontos zajforrás többek között ipari kemencékben és tüzelőberendezésekben, fáklyázásnál, repülőgép hajtóműveknél, gázturbináknál, és diesel motoroknál. Általában a problémák csak a végső tesztelés során jönnek elő, esetleg akkor, amikor már össze lett rakva a berendezés. Ekkor pedig már elég drága és/vagy nehéz beavatkozni a kialakításba [6].

Az utóbbi időkben a tartósan oszcilláló égés problémája, a hang és a rezgések növekedése, és így az égés instabillá válása, valamint a berendezések működési gondjai egyre inkább előjönnek. Ennek oka, hogy az emissziós normák betartása érdekében egyre nagyobb légfelesleggel kell tüzelni, mivel a nitrogénoxidok csökkentése ezt megkívánja. Sajnos a légfelesleg növelése azonban elősegíti az áramlási instabilitások kialakulását, valamint a lamináris lángterjedési sebesség csökkenését. (Alapvetően ugyan a turbulens lángterjedési sebesség más, de a lamináris lángterjedési sebesség

csökkenése miatt az is csökkenni fog. Az örvények belsejében a lamináris lángterjedési sebesség dominál, azonban az örvények mérete és áramlási jellemzői már befolyásolják az égést, így a lamináris nál nagyobb lángterjedési sebességeket tudunk elérni.) Ez vezetett oda, hogy egyre többet foglalkoznak az égési zajok minden aspektusával, beleértve az okát, a hang keletkezés mechanizmusát, a hang elfojtását, szabályozását, illetve az ezekhez szükséges számítási modellek fejlődését.

Fontos megjegyezni, hogy az égési zaj és az égési instabilitás között ugyan van összefüggés, de különböző fogalmak és folyamatok. Az égési zaj egy összetett spektrumú nyomásingadozás, melynek jellemzően 1500 – 2000 Hz közötti frekvenciájú összetevői vannak. Nincsenek benne jól definiált csúcsok, de a kémiai folyamatok miatt nem egyenletes a spektrális összetétele. Az égési instabilitás viszont egy fázis koherens, fix frekvenciás visszacsatoló rezgés. Magának az égési zajnak lehet hatása az égési folyamatra, de ez nem olyan erős hatás, hogy fázisban lévő oszcillációvá váljon. Általában egy jól működő berendezés a betáplált energiának 10^{-6}-10^{-5} nagyságrendű részét bocsátja ki hangenergiaként. Ha a rendszer valóban instabil, akkor ez a mennyiség 10^{-4} nagyságrendűvé is nőhet. Természetesen ez egyáltalán nem számítható veszteségnek a rendszer szempontjából, viszont a zaj és hatása nem elhanyagolható [5].

Az úgynevezett direkt égési zaj akkor keletkezik, amikor egy bizonyos térfogatú gáz az égés hatására felmelegszik és kitágul állandó nyomáson. A környező gáz tágulása hanghullámot eredményez, mely a láng határain túlra is kiterjed. A hanghullám nyomása és így a hang intenzitása attól függ, hogy milyen a forrás által okozott térfogatnövekedés aránya. Az ilyen forrásokat akusztikai monopólusoknak nevezzük [6]. Az akusztikai monopólus kísérletileg úgy állítható elő/képzelhető el, hogy egy buborék fel van töltve tüzelőanyag-levegő keverékkel, majd a közepén meggyújtjuk. A szituáció és a nyomáslefutás is térben szimmetrikus [5]. A szabadsugár zaját (amilyen az égésé is) az akusztikai kvadropólus modellezi. Míg a monopólus a Mach-számmal arányosan bocsát ki zajt, addig a kvadropólus Ma^5-el arányosan. Ebből következik, hogy kis teljesítménynél a monopólus a zajosabb (pl. szirénák), de nagy áramlási sebességek esetén már a kvadropólus.

Az energiatermelő és tolóerő kifejtésére használt gázturbináknál egyaránt diffúz lánggal üzemelő égőtereket alkalmaztak hagyományosan, mivel ezek megfelelő teljesítménnyel és stabilitási karakterisztikával rendelkeznek. Azonban ez a fajta égőtér kialakítás túl sok termikus NOx-et bocsát ki. A folyamatosan szigorodó környezetvédelmi előírások hatására a mérnököknek változtatni kellett ezen a jól bevált berendezésen, hogy tarthassák a normákat. Ezen új lehetőségek a gyengén előkevert tüzelés (lean-premixed (LPM) combustion, vagy folyékony tüzelőanyagoknál gyengén előkevert, előpárologtatott, lean-premixed prevaporized (LPP) combustion), az úgynevezett lépcsős vagy RQL tüzelés (rich-burn quick-quench lean-burn; a lényeg, hogy először tüzelőanyagban dúsan égetnek, majd egy segédlevegő bevezetéssel felhígítják a füstgázt és szegény tüzeléssel fejezik be az égést) vagy a katalitikus tüzelés. Az RQL tüzelésnél problémát jelent a koromképződés és a nem megfelelő keveredés a tüzelőanyagban dús rész utáni levegőbekeverésnél. A katalitikus tüzelésnél a költségekkel,

az élettartammal és a biztonsággal vannak problémák. Úgy tűnik jelenleg, hogy a gyakorlati alkalmazásnál a gyengén előkevert (előpárologtatott), LPM (LPP) tüzelés a legígéretesebb megoldás [7].

A gyengén előkevert tüzelésnél a levegő és a tüzelőanyag ellenáramban elő van keverve, hogy elkerüljék a sztöchiometrikus régiók kialakulását. A tűztérbe többlet levegőt vezetnek be, hogy csökkentsék a láng hőmérsékletét, ezzel csökkentve a termikus NOx képződést. Ezen módszer alkalmazásával azonban az úgynevezett változó áramlási oszcilláció (unsteady flow oscillation) vagy másnéven kvázistabil égés egy jellemző, jelentősebb problémává vált, gátolva az LPM/LPP égőterek fejlődését. Ezek a rezgések akár olyan amplitúdót is elérhetnek, hogy a berendezéssel interferálva, annak működését befolyásolják, extrém esetben a tönkremeneteléhez vezetnek. Ennek oka a túlzott szerkezeti vibráció és a tűztérnek történő hőátadás. A *2.3. ábra* bal oldalán egy lángcsőben ilyen folyamat által tönkrement földgázégő sorra láthatunk példát, jobb oldalt pedig egy új berendezés látható referenciának [7].

2.3. ábra. Égési instabilitás hatása [7].

Ha az égés során a hőfelszabadulás bármi okból periodikussá válik, az égés által kibocsátott hanghullámok szintén periodikusak lesznek, ugyanazzal a frekvenciával. Az égőtér bélése visszaveri ezeket a hanghullámokat egy bizonyos késleltetéssel, mely függ az égőtér alakjától és a hangsebességtől. Az égési instabilitást, mint a hőfelszabadulás és az akusztikai oszcilláció kapcsolatából eredő jelenséget először Lord Rayleigh mondta ki: Ha hőt közlünk a levegővel a legnagyobb sűrűsödés pillanatában vagy hőt vonunk el a legnagyobb ritkulás pillanatában, a vibráció erősödik. Ugyanakkor ha a hőt a legnagyobb ritkuláskor adjuk, vagy elvonjuk a legnagyobb sűrűsödéskor, a vibráció gyengül [8].

A hanghullámokhoz plusz energia adódik hozzá bármelyik frekvencián, ha a visszaérkező hullám csúcsa egybeesik a tüzelésben lévő periodikus hőfelszabadulás csúcsával. Ennek hatására folyamatosan növekszik az amplitúdó egészes addig, amíg a disszipáció miatt nem áll meg. Hasonló metódus eredményeként, ha ellenkező fázisban (180°-os fáziseltolással) találkozik a két jelenség, akkor az amplitúdó csökkenni fog. Ez a Rayleigh kritérium [6].

Az LPM/LPP tüzelőberendezéseknek számos tulajdonsága van, ami hajlamossá teszi őket az áramlásingadozásra. Egyrészt a rendszer általában az alsó gyulladási határ

körül működik. Emiatt egy kisebb zavarás a légfelesleg tényezőben nagyban befolyásolhatja a felszabaduló hő mennyiségét, mely ha rezonanciába kerül az égőtérben lévő akusztikai hullámokkal, erős égési instabilitásokat, lengéseket eredményezhet. Másrészt az előkevert égőterekben, kiváltképp az energiatermelő berendezéseknél, a láng relatíve rövid a longitudinális hanghullámok hullámhosszához képest és jellemzően az akusztikus nyomáshullámok duzzadóhelyén helyezkedik el. Az ilyen akusztikailag kompakt kialakítás megkönnyíti az interakciót az oszcilláló hőkibocsátás és az áramlás között. Továbbá, mivel a lángot egy aerodinamikailag indukált recirkuláló áramlás stabilizálja, egy erősebb áramlásingadozás az áramlás megfordulását és akár visszaégést is okozhat, a lángot ellenáramban a tüzelőanyag porlasztók felé hajtva [7].

Számos kifejezést használnak arra, hogy leírják a hangot, amit egy égő kibocsát, mikor instabilitások lépnek fel, azonban nincsen általános definíció ezekre. Néhány hajtómű-gyártó a dörgés („rumble") kifejezést minden hallható zajra használja frekvenciától függetlenül, míg mások a dörgés és morgás („growl") szavakat kifejezetten alacsony frekvenciájú (50-180 Hz) hangokra használják, melyek jellemzően alapjárat alatti üzemállapotokban jelentkeznek. A magasabb frekvenciák esetén, melyek az alapjárati vagy magasabb üzemállapotokban jellemzőek az üvöltés („howl") vagy zümmögés („humming") a helyénvaló kifejezés [6].

Más felosztás szerint az égési instabilitás egy adott gázturbina esetén az oszcilláció frekvenciája alapján az alábbi kategóriákba sorolható: Alacsony-, közép- és magasfrekvenciás instabilitás. Azonban nincsenek egységesen elfogadott határok ezek elkülönítésére sem.

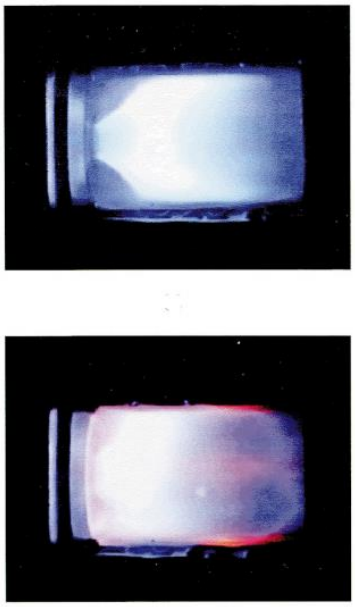
Az alacsony frekvenciás instabilitások a 30-50 Hz alattiak és gyakran a kezdődő lefúvási jelenséghez köthetőek. Ezeket dörgő/morajló instabilitásnak is nevezik. Olyan a hangjuk, mint ha egy tehervonat menne keresztül az erőművön. Nevezik őket „hideg hangoknak" (cold tones) is, mivel az amplitúdójuk növekszik, ahogy a lánghőmérséklet csökken [7].

A középfrekvenciás instabilitások tartománya az 50-1000 Hz és az égőtér hosszirányú sajáthangjával (amikor bizonyos frekvenciájú hang hullámhosszának egész számú többszöröse az égőtér hossza), illetve az akusztikai rezgések és a légfelesleg tényező változásának összekapcsolódásával állnak összefüggésben. „Forró hangoknak" (hot tones) is nevezik, mivel ezeknek a lánghőmérséklet növekedésével nő az amplitúdójuk [7].

A nagyfrekvenciás instabilitások az 1000 Hz fölöttiek, melyek az akusztikai zavarások és a láng alakulása közötti kapcsolatból származnak. Ezeket sikoltó („screech") instabilitásnak is nevezik és hatásuk elég romboló, akár percek alatt tönkretehetik a berendezést [7].

Broda és társai [9] végeztek kísérletet a perdület-stabilizált égés kapcsán. A rendszer egy örvényáramú porlasztóból , egy axiszimmetrikus égőtérből és egy fojtott fúvókából állt. Földgázt adagoltak be radiálisan 10 lyukon át a levegőáramba a perdítőelem után közvetlenül. A tüzelőanyag és levegő megfelelően összekeveredett az égőtérbe való belépés előtt. Széles légfelesleg tényező és hőmérséklet tartományon végezték a vizsgálatot. A *2.4. ábra* két tipikus esetről készült képet mutat, melyeknél a stabil és

instabil égés közötti jellemző különbségeket figyelhetjük meg. A felső a stabil (570 K belépő levegőhőmérséklet), az alsó az instabil égés (660 K belépő levegőhőmérséklet). Ezeknél a légfelesleg tényező 1,33, a tűztér nyomása pedig 4,8 bar volt [9]. A láng a kék, kúpos formáról átalakul egy eltorzult, fehéres színű, sok fényt kibocsátó alakra. A „sarokban" lévő recirkulációs zónában (corner recirculation zone, CRZ) az instabil esetben égőképes (és éppen égő) keverék van, míg stabil esetben ott nem játszódik le kémiai reakció [7].



2.4. ábra. Stabil (felül) és instabil (alul) égés [9].

2.3. A perdület-paraméter és a lángalak

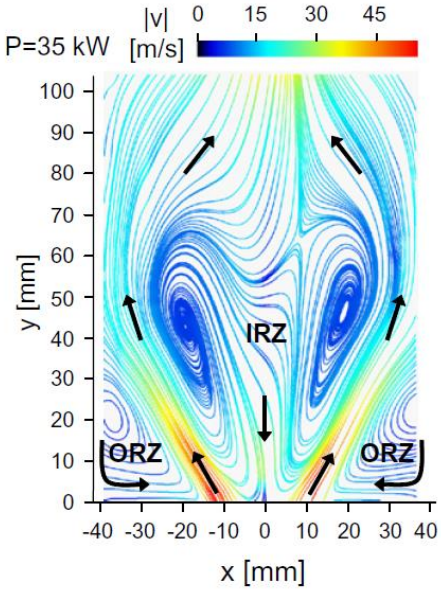
A perdület-paraméter egy dimenzió nélküli szám, mely arra szolgál, hogy a perdületes áramlást vagy égést létrehozó berendezések esetén összehasonlítható legyen az áramlás/égés. Értéke a következőképpen áll elő [10]:

$$S = \frac{G_\varphi}{G_x \cdot R}, \tag{2.2}$$

ahol G_x a közeg perdületének a tengelyirányú komponense, G_φ az axiális irányú impulzuserő és R a keverőcső sugara. Ennek számértéke alapján beszélhetünk gyengén perdületes ($S < 0{,}6$), illetve erősen perdületes áramlásokról ($S > 0{,}6$) [10].

A mérés során három különböző fázist különböztettünk meg. A két szélső eset az egyenes lángalak és a V alakú lángalak, melyek a gyengén-, illetve erősen perdületes állapotokhoz köthetőek. A V alakú láng esetében a precesszáló örvénymag leszakad és egy külső, valamint egy belső recirkulációs zóna is kialakul [10]. Ezt az esetet szemlélteti a *2.5. ábra*, melyen az IRZ, a belső recirkulációs zóna (Inner Recirculation Zone), az ORZ pedig a külső (Outer Recirculation Zone). Amikor az égő szájára kilépőelemet, diffúzort helyezünk, akkor lényegében a külső recirkulációs zónát töltjük ki anyaggal,

mely főként a falon megjelenő határréteg által, valamint geometriai, illetve hősugárzási okokból is elősegítheti a láng stabilitását.



2.5. ábra. Áramlási kép V alakú láng esetén [11].

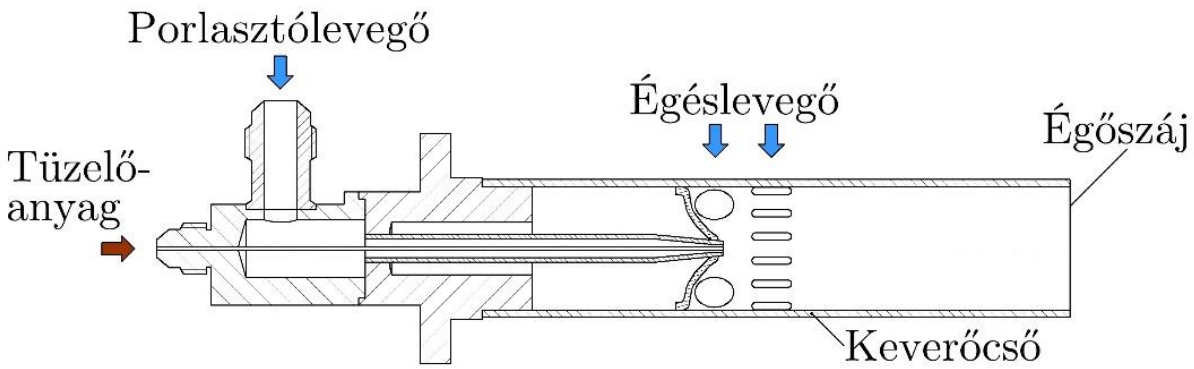
Ezen a két lángalakon kívül megkülönbözetjük még az úgynevezett bistabil állapotot is. Ekkor a láng már elkezd kinyílni, elkezd megjelenni a belső recirkulációs zóna. Mivel itt lényegesen alacsonyabb nyomás alakul ki, mint az egyenes lángalak esetén, az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter úszója ugrálni kezd, ami a teljes tömegáram mennyiségének változását eredményezi, ahogy az egyenes és a V alakú lángalakok váltakozva fordulnak elő [12]. Ez az üzemállapot kifejezetten negatív a berendezés szempontjából, mivel akár tönkre is teheti azt [7]. A bistabil állapot hasonlóan kezelendő, mint a rotordinamikában jelentkező kritikus fordulatszám. A zónán való minél gyorsabb áthaladás károsítja legkevésbé a berendezést [12]. A lángstabilitási fázisokról készült képeket mutat a *2.6. ábra*.

2.6. ábra. Képek a lángstabilitási fázisokról. Balról jobbra: egyenes, bistabil, V alakú.

3. A MÉRŐRENDSZER ÉS A VIZSGÁLATI MÓDSZEREK BEMUTATÁSA

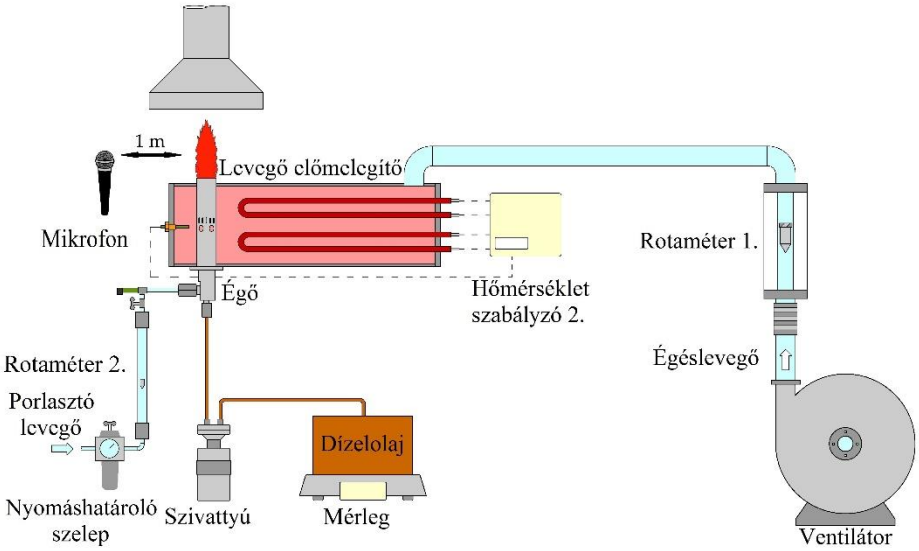
3.1. A mérési összeállítás és a mérés menete

A mérési sorozat, melynek a zaját vizsgáltam egy levegő segédközeges, előkeveréses, perdítőelemes, előpárologtató rendszerű (LPP – Lean Premixed Prevaporised) égővel zajlott (*3.1. ábra*), mellyel dízelolajat tüzeltünk. A központi tüzelőanyag vezetékkel párhuzamosan, gyűrű keresztmetszetben lép be a nagysebességű porlasztó levegő és a két közeg sebességkülönbségének hatására a folyadéksugár felbomlik és cseppek képződnek. Az égéslevegő négy tisztán radiális kör keresztmetszetű és tizenöt 45°-os téglalap keresztmetszetű nyíláson keresztül lép be a keverőcsőbe. Itt lehetőségük van a cseppeknek elpárologni, így már egy relatíve homogén tüzelőanyag-levegő keverék éri el a lángfrontot [12].



3.1. ábra. A mérés során használt LPP égő.

A *3.2. ábra* mutatja az atmoszférikus égővizsgáló tesztpadot. Az égéslevegőt egy ventilátor szállította és egy rotaméter mérte a térfogatáramát. A különböző mérési pontok beállítását egy frekvenciaváltó tette lehetővé. Az égéslevegőt egy szabályozható előmelegítő hevítette 400°C-ra mielőtt belépett az égő keverőcsövébe. A folyékony tüzelőanyagot egy digitális mérlegre helyezett edényből egy feszültség vezérelt fogaskerékszivattyú juttatta az égőbe. A porlasztólevegő térfogatáramát szintén egy rotaméter mérte, a kívánt porlasztónyomást pedig egy nyomáshatároló szelep biztosította és egy nyomástávadó mérte [12]. A láng zaját egy mikrofon mérte, melyet a lángtól 1 m-re helyeztünk el, főbb adatait a *3.1. táblázat* tartalmazza, azonos berendezésről egy képet a *3.3. ábra* mutat.



3.2. ábra. A méréshez használt tesztpad elvi felépítése.

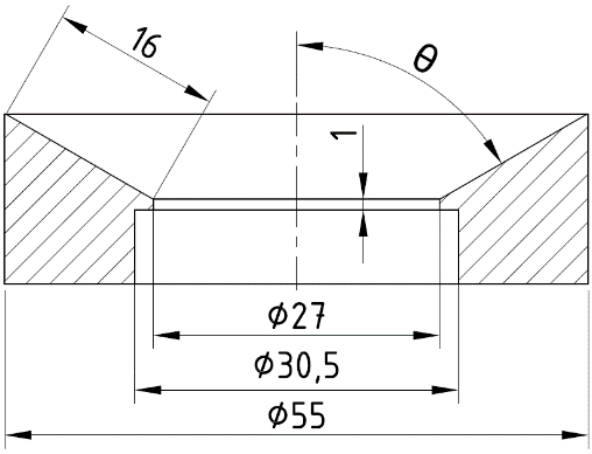
3.1. táblázat. A mikrofon és a mérő készülék adatai.

Mérő készülék	Típus	Svantek 971
	Szériaszám	40380
Mikrofon	Gyártó	ACO Pacific
	Típus	7052E, ½" előpolarizált, kondenzátormikrofon
	Szériaszám	59128
	Érzékenység	28,74 mV/Pa

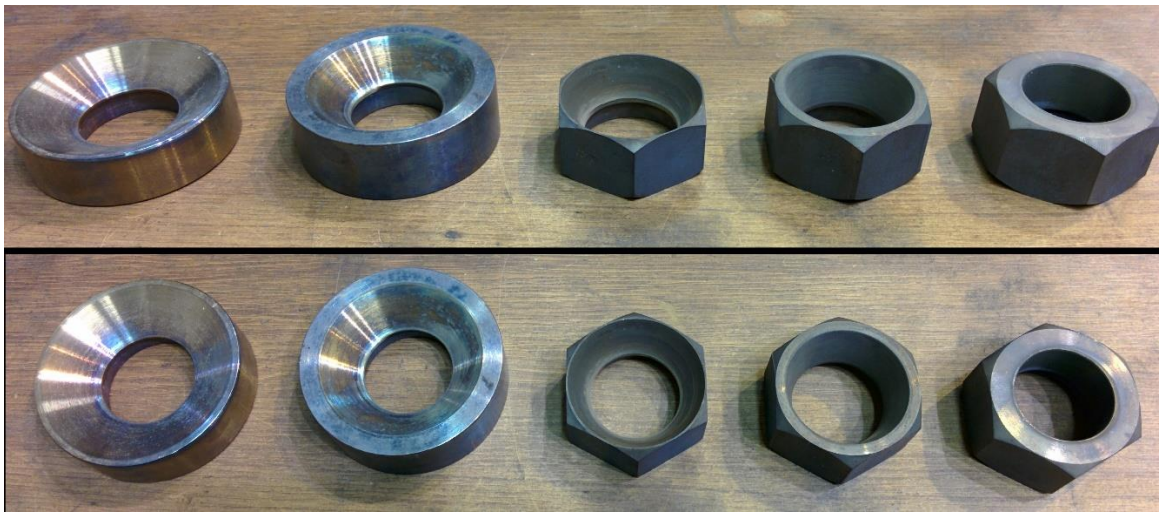
3.3. ábra. Mikrofonos mérőeszköz.

A mérés során az égő szájára különböző félkúpszögű diffúzorok kerültek. Mivel a különböző félkúpszögű diffúzoros toldatok azonos méretű hengerekből lettek kimunkálva, a többlet anyag lehűtheti a lángot. Részben emiatt terjedt ki a mérés a 0°-os

félkúpszögű elemre is, ami gyakorlatilag a keverőcső megtoldását jelentette mintegy 21%-kal. A vizsgált konfigurációk metszetét a *3.4. ábra* szemlélteti, alatta pedig maguk a használt diffúzorok láthatóak (*3.5. ábra*). A diffúzorok alkotója minden esetben 16 mm volt. Ezeket a 30 mm külső átmérőjű égő szájára illesztettük a megvezetés segítségével [12]. A mérések a következőképpen zajlottak: adott tüzelőanyag tömegáram és fúvóka konstrukció mellett állandó porlasztónyomáson, egyenlő lépésközönként fokozatosan növeltük az égéslevegő mennyiségét 10 m^3/h-tól a láng lefúvásáig.



3.4. ábra. A diffúzorok metszetrajza.

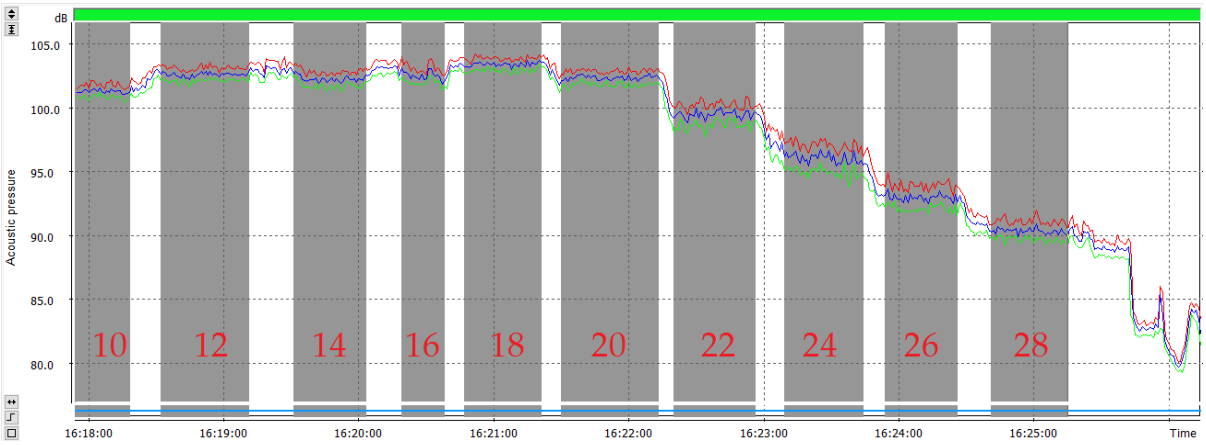


3.5. ábra. A méréshez használt diffúzorok. Balról jobbra: 60°, 45°, 30°, 15°, 0°.

3.2. Mintavételezés, adatfeldolgozás, hibaszámítás

A mérési sorozat 6 mérésből állt (diffúzor nélküli, valamint az öt különböző diffúzoros). Minden egyes mérésben volt 6 mérési beállítás a porlasztási nyomást növelve és mindegyik mérési beállítás tartalmazott a stabilitástól függően 6-11 mérési pontot, melyekben az égéslevegő térfogatárama volt a paraméter. Az összesen 36 mérési beállítás esetén valamennyiről készült hangfelvétel, melyek .SVL (SvanPC++ Logger) fájlokban vannak elmentve.

A hangfájlok feldolgozásához Excelt, illetve a SvanPC++ nevű szoftvert használtam. A *3.6. ábra* mutat egy tipikus mérési fájlt. A vízszintes tengelyen az idő található, a függőlegesen pedig a hangnyomásszint. Jelen munkában csak az egyenértékű hangnyomásszint vizsgálatával és különböző mérési paraméterekkel való összehasonlításával foglalkoztam. A zaj spektrális jellemzését a jelenlegi munka folytatásaként tervezzük elvégezni. A hangfelvétel mindig a láng begyújtása után indult el, a görbe végén látható letörés pedig a lángkialvást jelzi.



3.6. ábra. Tipikus mérési fájl és a kijelölt mérési pontok. Az ábra a 15°-os félkúpszögű diffúzor 1,55 bar porlasztási túlnyomású esetéhez tartozik, a piros számok az égéslevegő térfogatáramát jelölik m³/h-ban.

A mérés kiértékelése során minden egyes mérési beállításhoz tartozó hangfájlt külön fel kellett dolgozni. Az összes méréshez tartozik egy mérési terv, melynek segítségével azonosítani lehetett a különböző mérési pontokat. Tekintve, hogy a mérés elvégzése manuálisan történt, a hangfájlokban a mérési pontok időtartama és helye minden esetben egyedi, ezért nem lehetett olyan algoritmust vagy excel függvényt készíteni, amely megfelelően kiválogatja ezeket.

A stacioner, beállt állapot esetén nagyjából vízszintesen halad a görbe, amikor növeljük az égéslevegő térfogatáramát, akkor pedig növekszik vagy csökken, majd beáll egy új egyensúlyi állapotra. A különbség két egyensúlyi állapot között bizonyos szakaszokon nem teljesen egyértelmű, ezért manuális és időigényes minden pont beazonosítása. Az *3.6. ábra* mutatja a kijelölt mérési pontokat is. Ebben az esetben főleg a közepétől nagyon szépen látszanak sorban a mérési pontok, majd a végén a lánglefúvás.

Amikor megvolt a pontok kijelölése, akkor lehetett elkezdeni az excelben az értékek feldolgozását. A programból ki lehet menteni egy excel munkafüzetbe az összes értéket másodperces bontásban. A kiértékeléshez használt adatokat a *3.2. táblázat* mutatja.

3.2. táblázat. A kiértékeléshez használt adatok egy mérési beállítás esetén.

S [-]	Lángalak	LZF_{max} [dBZ]	LZF_{min} [dBZ]	L_{eq} [dBZ]	max-min [dBZ]	max-eq [dBZ]	eq-min [dBZ]
0,224	egyenes	101,805	100,845	101,313	0,960	0,492	0,468
0,261	egyenes	103,130	102,150	102,624	0,980	0,506	0,474
0,297	egyenes	102,846	101,752	102,270	1,093	0,575	0,518
0,330	egyenes	103,117	102,005	102,526	1,112	0,591	0,521
0,362	egyenes	103,870	102,960	103,425	0,910	0,445	0,465
0,392	bistabil	102,895	101,847	102,380	1,048	0,514	0,534
0,421	bistabil	100,245	98,700	99,505	1,544	0,740	0,805
0,448	bistabil	97,067	94,992	96,073	2,076	0,994	1,082
0,474	V	93,930	92,123	92,990	1,807	0,940	0,867
0,499	V	91,100	89,675	90,348	1,425	0,752	0,673

A vizsgált intervallumok kijelölése után a kimentett értékek átlagolásával meghatároztam az adott mérési ponthoz tartozó átlagos egyenértékű hangnyomásszintet. Mivel az integrálási idő 1 s volt, a mintavételi frekvencia pedig 12 kHz, ezért a feldolgozó egység meghatározott egy maximális, egy minimális és az ezek átlagát mutató közepes egyenértékű hangnyomásszintet. A maximális és minimális görbe távolsága jellemzi az adott intervallumon tapasztalható oszcillációt a hangnyomásszintben. Az utolsó három oszlop rendre a maximális és minimális, maximális és közepes és közepes és minimális átlagértékek különbségéből áll elő. Az eredmények részletes értékelésével a *4. fejezetben* foglalkozok.

Ezeken az értékeken kívül szükségem volt még a porlasztási nyomásra, melyet egy excel fájlból olvastam ki. Öt másodpercenként volt regisztrálva, azonban egy mérési beállításhoz az egész időintervallum átlagát vettem, mivel jó közelítéssel állandónak vehető. Ezek után meghatároztam a perdület-paraméter értékét minden mérési pontra.

Az *3.2. táblázat* értékei Z szűrős esetre vonatkoznak. A mikrofon segítségével felvételnél lehet Z, A, C és B szűrést kérni. Esetünkben Z, A és C szűrős felvétel készült. A kiértékelésekhez felhasználtam az A szűrős felvételt is, és ezekre az értékekre is elkészítettem az átlagokat.

Mint minden mérés, ez is hibával terhelt. Az én esetemben a legrelevánsabb és legjelentősebb hiba a perdület-paraméter értékében lehet. Ahogy a *2.3 alfejezet* (2.2) egyenletében leírtam, a perdület-paraméter a következőképp áll elő:

$$S = \frac{G_\varphi}{G_x \cdot R}, \tag{2.2}$$

A hibaszámításhoz a G_x és G_φ értékeket kellett vizsgálnom. A legjelentősebb hibát a rotaméterek okozhatják, vagyis az égéslevegő térfogatáramának, illetve a porlasztó levegő térfogatáramának a hibája. Előbbi a G_φ, utóbbi a G_x értékét befolyásolja.

A rotaméterek hibájának figyelembevétele úgy történik, hogy meg van adva egy hibaszázalék, melynek negyede a rotaméter mérési tartományának egészére vonatkozó

abszolút hibát ad, háromnegyede pedig a leolvasott értékben számít. A porlasztó levegőt mérő eszköznek a megadott hibája 4%, az égési levegőhöz használtnak pedig 2,5 %. A porlasztólevegőt mérő rotaméternek 30 l/min, az égéslevegőt mérőnek pedig 30 m^3/h a méréshatára, tehát ennek az 1%-a illetve 0,625%-a megjelenik hibaként. A mérési pontokat adott mérési beállításnál ~10-26 m^3/h égéslevegő térfogatáram között, 2 m^3/h-ás lépésközökkel vettük fel, a mérési beállítások adott diffúzor esetén pedig 10 és 20 l/min-es porlasztólevegő térfogatáram között, 2 l/min-es lépésközökkel voltak.

Az égéslevegő és a porlasztólevegő hibája a fenti megfontolásokkal a következőképp áll elő:

$$\Delta V_{él} = 0{,}01 \cdot 30 + 0{,}03 \cdot V_{él} \tag{3.1}$$

$$\Delta V_{porl} = 0{,}00625 \cdot 30 + 0{,}01875 \cdot V_{porl}, \tag{3.2}$$

ahol $V_{él}$ és V_{porl} a rotaméterekről leolvasott értékek. Ezekből a perdület-paraméter hibája:

$$\Delta S(V_{él}, V_{porl}) = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial V_{él}} \cdot \Delta V_{él}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial V_{porl}} \cdot \Delta V_{porl}\right)^2} \tag{3.3}$$

Az (3.3) összefüggés eredményeit, így a hibát minden mérési pontra a *Függelék* tartalmazza.

4. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

4.1. A lángalak hatása a zajra

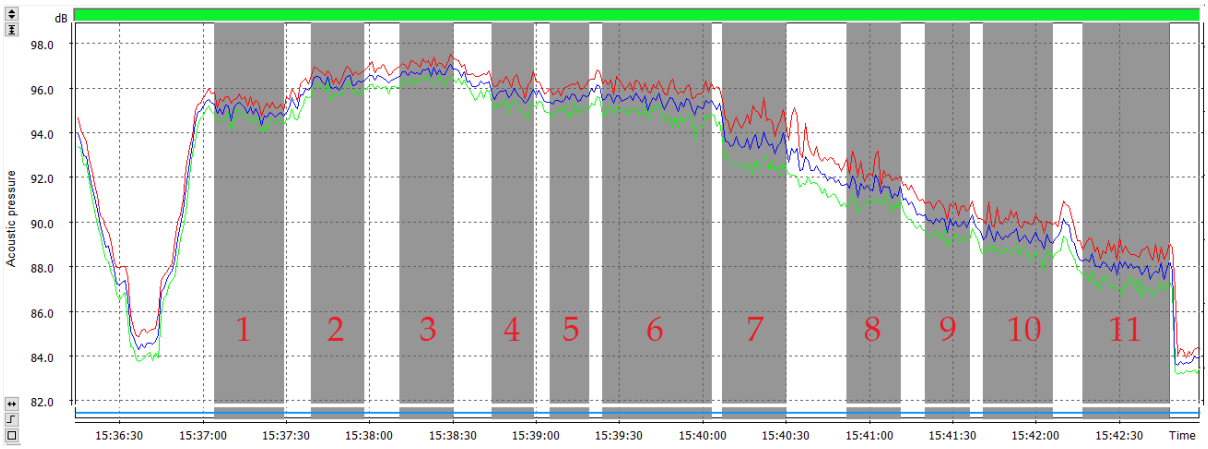
Ebben a fejezetben a lángalak hatását vizsgálom a keletkező zajra. Mivel rengeteg hasonló adatsorral dolgoztam, ezért a kiértékelés legjobb módjának azt tartom, hogy először kiválasztok egy reprezentatív mérési beállítást és annak az eredményeit elemzem. Ezek után, az alapvető jellemzők megismerését követően kitérek majd arra, hogy a Z és A szűrővel feldolgozott mérési adatok között milyen korreláció és különbség van. Az alfejezet legvégén pedig a reprezentatív mérés következtetéseit terjesztem ki a többi esetre is. Minden egyes adatot nem használok fel, azonban a *Függelékben* összegyűjtöttem minden lényeges információt, ami a kiértékelés elvégzéséhez szükséges.

Mindenképp meg kell jegyezni azt, hogy minden egyes mérés nem hasonlítható teljes mértékben össze egymással. A láng stabilitásának változása miatt az égéslevegő térfogatáramát növelve bizonyos esetekben már a bistabil láng sem jelent meg, máshol pedig ugyan bistabillá vált, de a V alakot már nem érte el, hanem hamarabb kialudt. A most bemutatott példa esetén szépen megjelenik mind a három lángstabilitási tartomány, így ezen keresztül mintapélda szerűen tudom szemléltetni a hatásokat.

A kiválasztott mérés esetén 30°-os félkúpszögű diffúzor volt az égőn, a porlasztólevegő térfogatárama 14 l/min volt, az égéslevegő térfogatárama 10 és 30 m^3/h között változott, a porlasztónyomás átlagos értéke 0,627 barg volt. (A barg mértékegységben g a „gauge pressure" vagyis túlnyomás kifejezésre utal. Ez a mértékegység így a légköri nyomáshoz képesti túlnyomást jelöli, a dolgozatomban ezt használom.) A mért és számolt értékeket a *4.1. táblázat* tartalmazza, a Z szűrős adatsor időbeli lefutását pedig a *4.1. ábra* mutatja. A táblázat első oszlopában a mérési pont sorszáma található, melyet az ábrán bejelöltem, így azonosíthatóak az egyes mérési pontok.

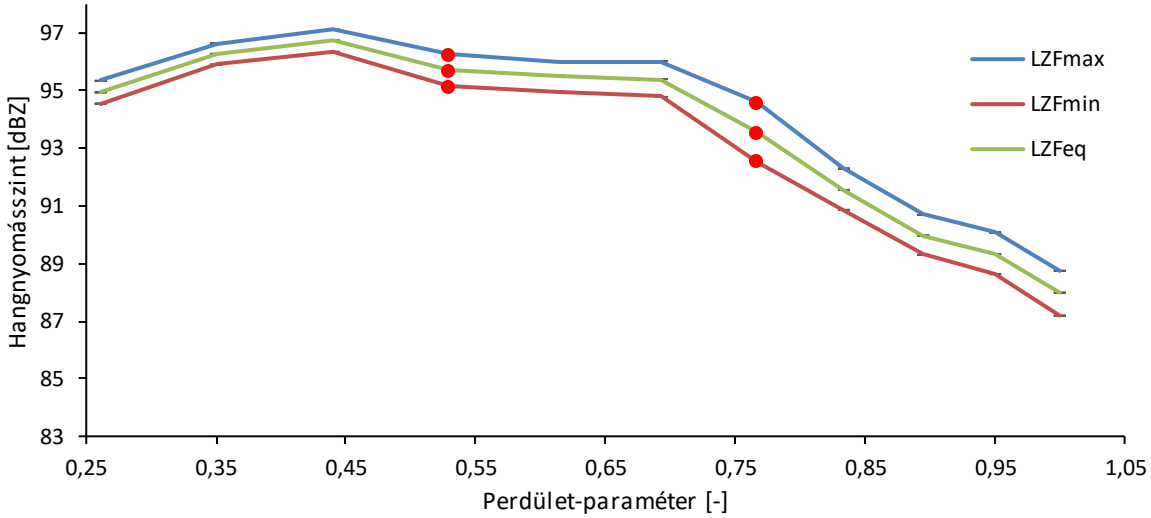
4.1. táblázat. A reprezentatív mérés feldolgozásához használt értékek.

	$V_{él}$ [m^3/h]	S [-]	Lángalak	LZFmax [dBZ]	LZFmin [dBZ]	Leq [dBZ]	max-min [dBZ]	max-eq [dBZ]	eq-min [dBZ]
1	10	0,2611	egyenes	95,345	94,551	94,943	0,794	0,402	0,392
2	12	0,3500	egyenes	96,656	95,906	96,281	0,749	0,375	0,375
3	14	0,4404	egyenes	97,135	96,350	96,751	0,784	0,384	0,400
4	16	0,5289	bistabil	96,255	95,156	95,700	1,099	0,556	0,544
5	18	0,6137	bistabil	96,025	94,989	95,530	1,036	0,495	0,541
6	20	0,6932	bistabil	96,029	94,783	95,405	1,246	0,625	0,621
7	22	0,7666	V	94,603	92,546	93,552	2,057	1,051	1,006
8	24	0,8338	V	92,297	90,861	91,554	1,436	0,742	0,693
9	26	0,8949	V	90,690	89,303	89,971	1,387	0,718	0,668
10	28	0,9503	V	90,076	88,633	89,332	1,444	0,744	0,699
11	30	1,0001	V	88,745	87,190	87,987	1,556	0,759	0,797



4.1. ábra. A reprezentatív mérés időbeli lefutása a kijelölt mérési pontokkal.

Először nézzük meg a lángalak hatását az egyenértékű hangnyomásszintre. A *4.2. ábra* mutatja a perdület-paraméter függvényében a Z szűrős egyenértékű hangnyomásszint lefutását. A három görbe a *4.1. ábra* három görbéje, melyek – ahogy azt korábban már leírtam – lényegében egy sávot jelölnek ki, amiben a hangnyomásszint ingadozik az adott perdület-paraméter értéknél. A diagramon láthatóak piros jelölők, amik három részre osztják fel a görbét. Az első jelölő előtt egyenes a láng, a két jelölő között bistabil, az utolsó szakaszon pedig V alakú. A görbéken rajta vannak a hibasávok is, de szinte elenyészőek, ezért alig látszanak.



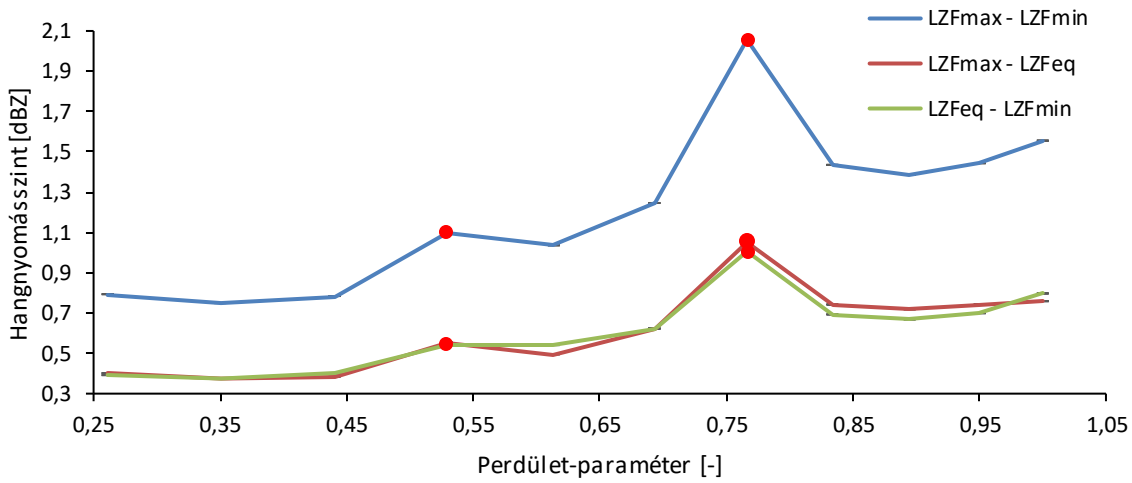
4.2. ábra. Z szűrős hangnyomásszint a perdület-paraméter függvényében.

Azt láthatjuk, hogy az egyenes lángalak esetén enyhén emelkedik (a többi mérési beállításnál vagy enyhén emelkedik vagy szinte vízszintes), majd a bistabil tartományban kicsit elkezd csökkenni, amikor V alakúvá válik, akkor pedig van egy éles letörés a 0,7-es perdület-paraméter érték után. A mérés során hallhatjuk is, hogy csendesedik a láng. Szabadsugarak esetén – amilyen a vizsgált láng is – az égési zaj elsősorban a nyírásból származik. A V alakú láng esetén a lángfrontnál kisebb az áramlási sebesség,

ami ebből a szempontból kedvezően hat. A mögöttes okok közé tartozhat még, hogy a perdületesség növekedésével jobb lesz a keveredés. A nagy gradiensek (például az inhomogén keverék miatt) a nagy struktúrában és a mikroskálán - vagyis a lángon belül - okozhatnak megnövekedett zajt, tehát a keveredés mindenképpen homogénebbé teszi az áramlást és a lejátszódó égési folyamatot, ami magyarázatot adhat a szignifikánsan lecsökkenő hangnyomásszintre.

Érdemes megfigyelni, hogy amíg az egyenes lángalaknál relatíve közel, jól együtt futnak a görbék – tehát a hangnyomásszint ingadozása kisebb -, addig a bistabil és V alakú láng esetén szemmel láthatóan jobban szórnak az értékek. Ennek a jelenségnek a jobb megmutatása érdekében készítettem a *4.1. táblázat* utolsó három oszlopát. Grafikonon ábrázolva a *4.3. ábra* mutatja a különbségeket szintén a perdület-paraméter függvényében.

A két alsó görbe a maximális és az átlagos, valamint a minimális és átlagos távolságát mutatja. Látszik belőlük, hogy a közepes egyenértékű hangnyomásszintet valóban a maximális és minimális közé középre illesztette a szoftver. A felső görbe a két alsónak az összege, az egész sávnak a szélessége. A *4.3. ábra* még jobban mutatja, az átlagok görbéinek távolodását, melyet a *4.2. ábra* esetén már észrevehettünk. A piros jelölők itt is a lángstabilitási fázis váltásánál vannak. Ezen is rajta van a perdület-paraméter hibája, de nem számottevő, az adatsor eltakarja.



4.3. ábra. Z szűrős hangnyomásszint oszcillációja a perdület-paraméter függvényében.

Amit látunk tehát az az, hogy az egyenes lángalak esetén szinte teljesen vízszintesek a görbék, ami azt jelenti, hogy elég egyenletesen alakul a hangnyomásszint, majd amikor bistabillá válik a láng, akkor elkezd megnövekedni a hangnyomás ingadozása. A bistabil szakasz jó része is egy állandó mértékű oszcillációt mutat, azonban a vége felé elkezd növekedni a hangnyomás ingadozása és van egy jól definiálható csúcs, utána pedig látványosan visszacsökken egy alacsonyabb értékre az ingadozás. Ennél a bemutatott mérésnél éppen a V alak határához esik ez a pont, de alapvetően ez nem általánosítható. A lángalakok elkülönítése úgy történt, hogy a bistabil szakasznál az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter ugrált, valamint amikor V alakú lett a láng,

azt szemrevételezéssel is láthattuk, ezért nincs egy olyan egzakt módszer, amivel ezt mindig tökéletesen fel lehetett jegyezni. A mérési pontok kijelölése akkor történt, amikor a mérési tervben meghatározott égési levegő térfogatáramhoz tartozó állapot állandósult. Azonban a bistabillá vagy V alakúvá válás sokszor megtörtént egy köztes térfogatáram értéknél (például 20 m^3/h-nál még bistabil volt, 21,2 m^3/h-nál V alakú lett, de a következő mérési pont 22 m^3/h-nál van). Ezért van olyan, hogy a bistabil tartomány utolsó pontja, de van, hogy a V alakú tartomány első pontja van a kiugró értéknél a kiértékelés során. Ami egyértelműen látszik, hogy a bistabil szakasz vége felé meredeken növekedni kezd a hangnyomásszint ingadozása és valahol a bistabil és a V alak átmeneténél jelentős oszcilláció lép fel a hangnyomásszintben.

A bistabillá váló láng esetén egy átmeneti tartományba érünk. Az egyenes láng néha (eleinte másodperces nagyságrendű ismétlődéssel) kinyílik V alakúvá, ahogy megjelenik a belső recirkulációs zóna, majd mivel ez még nem tud elég alacsony nyomást létrehozni az áramvonalak folyamatos meggörbítéséhez, ezért összeomlik és visszaugrik a láng egyenes alakúvá. Ha megnézzük a *4.2. ábra* görbéit, akkor láthatjuk, hogy amikor a bistabil szakaszba átlép a láng, akkor a maximális egyenértékű hangnyomásszint láthatóan enyhébben csökken a minimálisnál, majd végig a bistabil szakaszon megmarad ez a tendencia. Ennek az oka, hogy a megjelenő V alakú láng halkabb az egyenesnél, de mivel csak „ritkán", ütésszerűen jelenik meg, ezért azt eredményezi, hogy az oszcilláció (*4.3. ábra*) enyhén növekszik, mivel a minimális hangnyomásszintet csökkenti. A másik határon, a bistabil és V alak között hasonló folyamat játszódik le, csak fordított arányokkal. Megjelenik a V alakú láng, arányaiban már stabilabban, mint az egyenes, ezért a *4.2. ábra* görbéiből láthatóan, jócskán halkul a láng. Viszont még néha visszaugrik egyenesbe, ami pedig hangosabb üzemállapotot jelent, és ezen a határon e két folyamat eredményez egy ilyen kiugró oszcillációt.

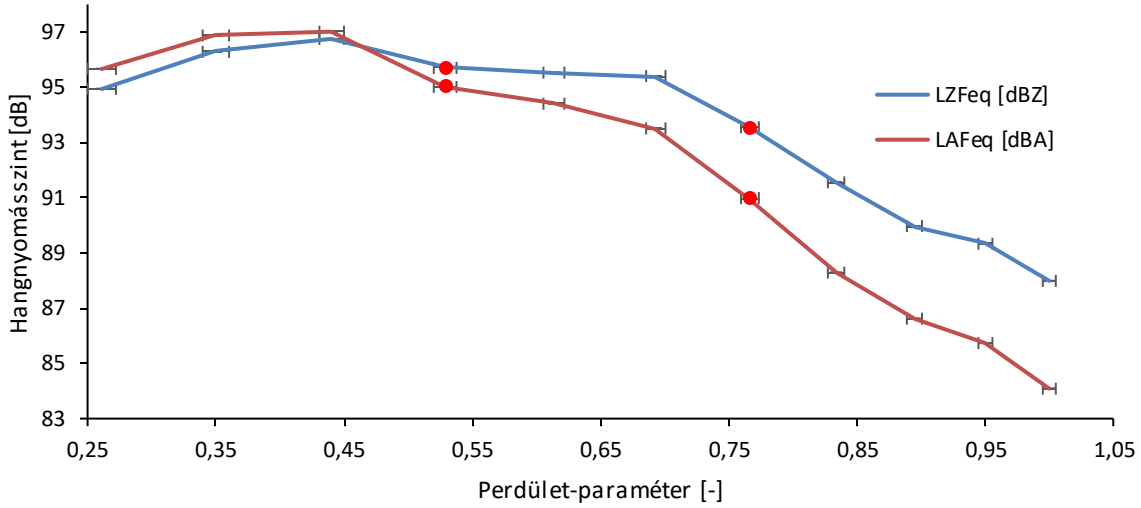
A V alakúvá vált láng ismét visszaáll egy állandóbb oszcillációra, azonban ez láthatóan magasabb, mint a korábbiak. Ebből látszik, hogy a V alakú láng hangja ugyan halkabb, de jobban ingadozik. Ez az ingadozás a dinamikus viselkedést magyarázza, ami a lángleszakadásnak lehet előjele. Feltűnhet, hogy a vége felé enyhén felkunkorodik a görbe, azonban ennek a jelenségnek a magyarázatát, illetve hogy mi adja az egyenértékű hangnyomásszint jelentősebb oszcillációját a V alak esetén, már a spektrumban kell majd keresni.

Ahogy azt a *2.1 alfejezetben* már említettem, a hangnyomásszint mérésénél szokás szűrőket alkalmazni. A Z szűrős esetnek azt nevezzük, amikor igazából nincs szűrő, hanem a közegben bekövetkező tényleges nyomásváltozásból eredő egyenértékű hangnyomásszint értéket jelenítjük meg (a berendezésre nyilvánvalóan ez gyakorol hatást), az A szűrő pedig arról ad jobb képet, hogy az emberi fül miként érzékeli a hangot. Mivel lehetőségem volt rá, ezért megnéztem, hogy A szűrővel milyen képet mutatnak a *4.2. ábra* görbéi.

A *4.4. ábra* mutatja az átlagos egyenértékű hangnyomásszint alakulását a perdületparaméter függvényében a két féle szűrővel vizsgált esetre. Látható, hogy az egyenes lángalak az emberi fül számára enyhén hangosabb, majd a bistabil lángalaktól jelentős

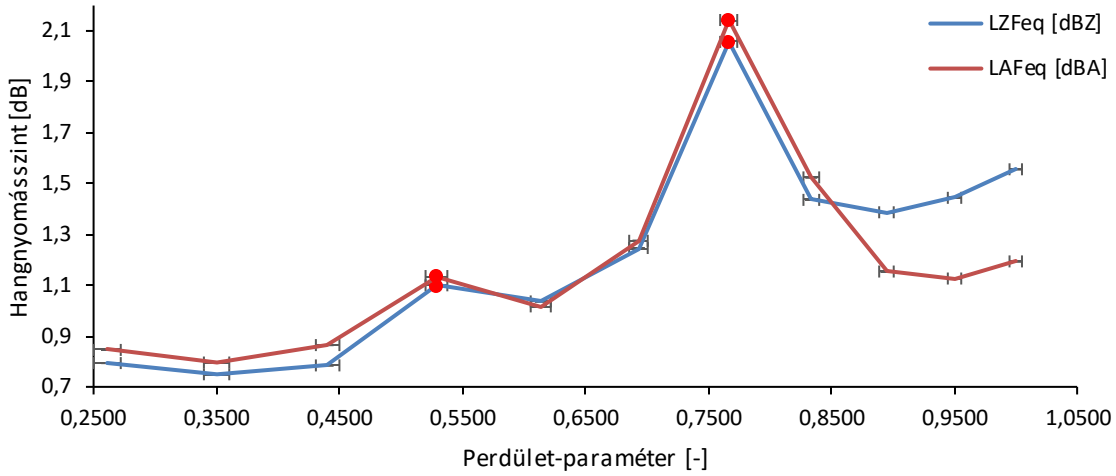
különbség mutatkozik. Míg a Z szűrőnél a bistabil szakasz egyenletes, majd a V alaknál következik be a letörés, addig A szűrőnél a bistabil lángalaknál is van egy enyhe, ám egyenletesnek tűnő csökkenés és utána letörés. Ez egyrészt azt jelenti, hogy az emberi fül folyamatosan halkabbnak érzékeli a hangot a perdület-paraméter növekedésével, illetve a V alakú hangot 2-4 dB-el is halkabbnak hallja, mint amilyen valójában. Ennek a magyarázatát a hang különböző frekvenciájú összetevőinek változásában kell keresni, azonban jelen dolgozat még nem tartalmazza a spektrális analízist, ez a kutatás folytatásának részét képezi.

Ahol esetleg hasznos lehet ennek az eltérésnek az ismerete az a berendezések műszerezése. Jelen dolgozat arra szintén nem terjed ki, hogy konkrét javaslatokat fogalmazzak meg egy tüzelőberendezés akusztikai műszerezésével kapcsolatban, viszont ebből láthatjuk, hogy ha A szűrővel vizsgáljuk a láng zaját, akkor egy olyan görbét kapunk, ami a perdület-paramétertől egyenletesebben, meredekebben függ. Tehát ha esetleg a perdület-paraméterre vagy lángalakra szeretnénk következtetni a hangnyomásszintből, akkor A szűrővel vizsgálva a hangot vélhetően jobban kalibrálható lenne a diagnosztikai mérés.



4.4. ábra. Hangnyomásszint a perdület-paraméter függvényében A és Z szűrő esetén.

A másik fentebb vizsgált jellemzőt, az oszcilláció mértékét a *4.5. ábra* mutatja. Ennek tekintetében azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az oszcilláció mértéke az A szűrő esetén egészen a kialakult V lángalakig jó közelítéssel egyezik a Z szűrős esettel. Itt is megjelenik a csúcs, szinte tényleg együtt fut a két görbe. A V alak esetén láthatjuk, hogy az A szűrővel mért értékek kevésbé oszcillálnak. Ez esetleg arra engedhet következtetni hogy a zaj spektruma az alacsonyabb frekvenciák felé tolódik el, mivel azt az emberi fül aránylag kevésbé hallja.

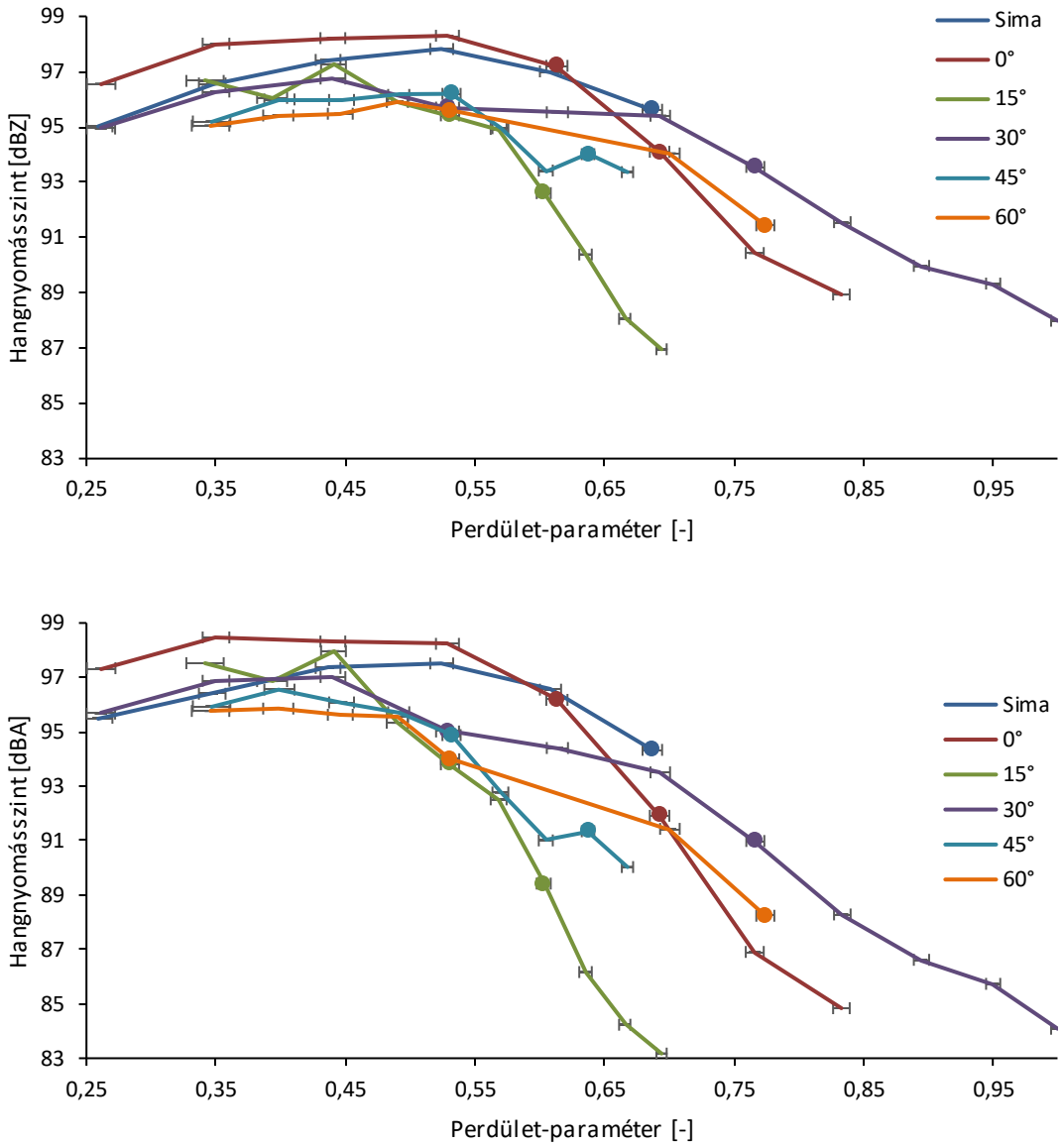


4.5. ábra. A hangnyomásszint ingadozása a perdület-paraméter függvényében A és Z szűrő esetén.

A fejezetben eddig ismertetett jelenségek kiterjesztését mutatom be a következőkben. Mind a két jellemző ábrát (hangnyomásszint és ingadozás a perdület-paraméter függvényében) elkészítettem úgy, hogy több mérési beállítás is látható legyen rajta A *4.6. ábra* az átlagos egyenértékű hangnyomásszinteket (LZFeq és LAFeq) ábrázolja a különböző diffúzorok esetén. A jobb összehasonlíthatóság érdekében minden diffúzor esetén azt a mérési beállítást választottam ki, amelynél 0,6 barg körüli porlasztónyomás volt, tehát ezek a mérési beállítások tartoznak össze ebből a szempontból. A görbe színével megjelölt pontok a lángstabilitási fázis változását jelölik, ahogy korábban a piros jelölők.

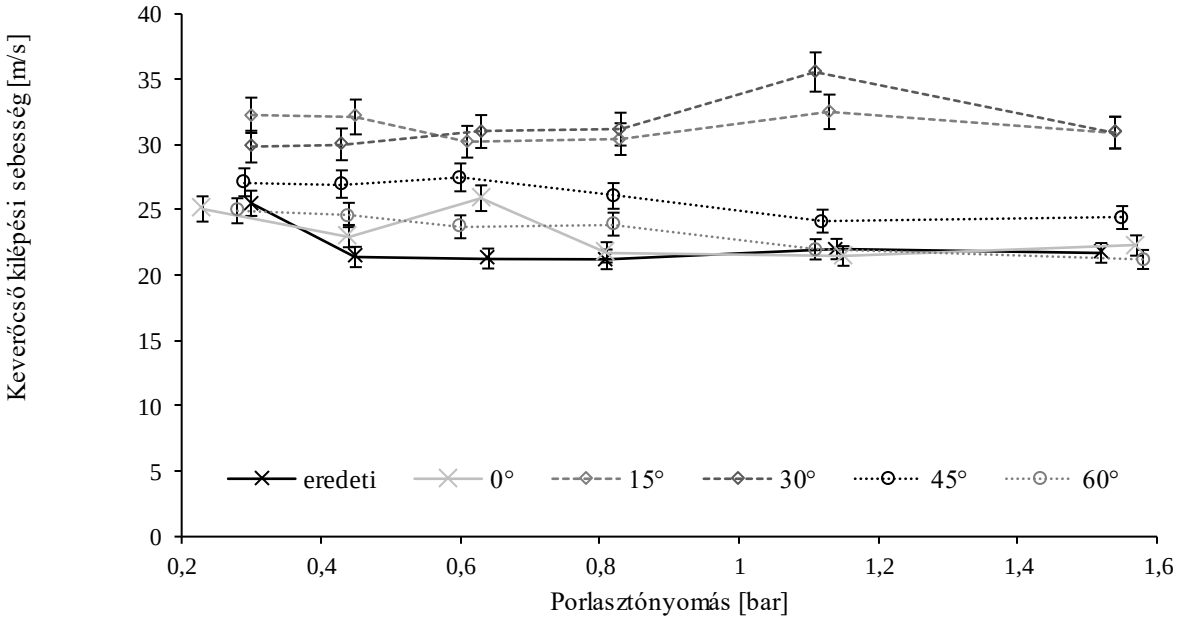
Azt, hogy a hangnyomásszint milyen meredekséggel, hogyan indul el a bistabil szakaszon és hogyan törik majd le, nem lehet általánosítani. Ez éppen a bistabil lángalak jellegéből fakad. A különböző diffúzorok befolyásolják a láng stabilitását, tehát hogy az egyes mérési pontokban az egyenes vagy a V alak dominál, emiatt néhol a bistabil szakaszok meredekebben csökkennek, néhol laposabban. A dolgozat nem terjed ki arra, hogy pontosan összevesse a hangot az ugyanezen mérési sorozatból született diffúzorok stabilizáló hatását vizsgáló kutatással, de erre a későbbiekben még sor kerülhet.

Az mindenképp látszik ezekből a görbékből, hogy a bistabil szakaszokon elkezdődik egy halkulás, majd a stabil V alak kisebb zaja dominánssá válva „letöri" a görbét, mikor stabilan ki tud alakulni a belső recirkulációs zóna. Amit látunk még az az, hogy az A zűrős eset itt is egy egyenletesebb jelleget mutat, míg a Z szűrősnél a görbék maximum 10 dBZ-t változnak, addig itt akár 14-15 dBA-t is. (Vagyis a hangnyomásszint 10 dB-el lesz alacsonyabb összességében, de az ember 14-15 dB-nek is érzékelheti, ami a logaritmikus skála miatt jelentős különbség.)



4.6. ábra. Az egyenértékű hangnyomásszint a perdület-paraméter függvényében különböző diffúzorok esetén, A (lent) és Z (fent) szűrős adatokra.

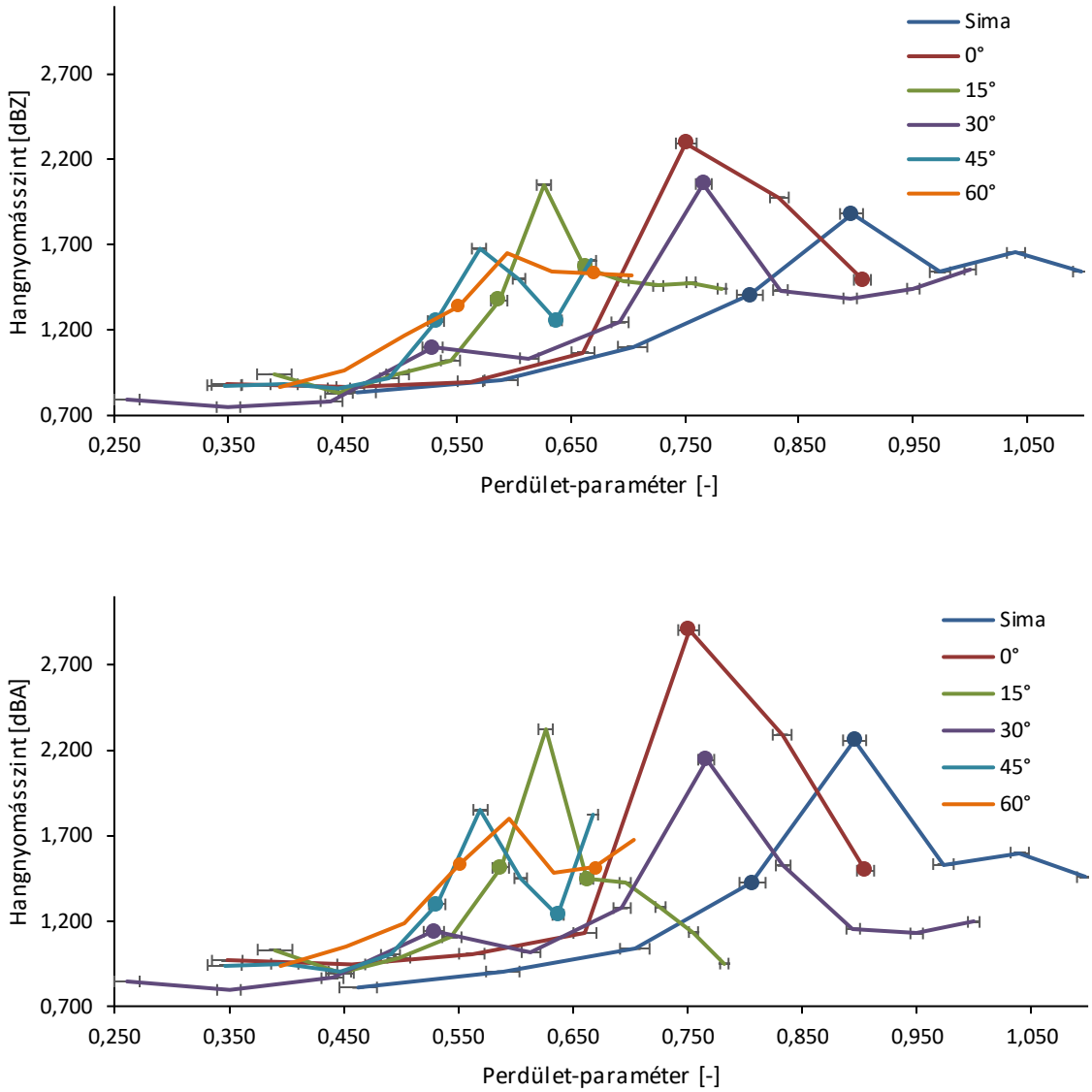
Nem a zaj elemzéséhez tartozik szorosan hozzá, de látszik például, hogy míg a diffúzor nélküli esetben a 0,25-0,7 perdület-paraméter tartományon volt stabil égés, addig a 0°-os diffúzor (lényegében meghosszabbított keverőcső) a 0,25-0,83 tartományban, vagy például a 30°-os diffúzor a 0,25-1 tartományon. Ebből arra lehet következtetni, hogy ezek a konstrukciók előnyösen befolyásolják a lángstabilitást. Ugyanezen égő és mérési sorozat kapcsán a diffúzorok lángstabilizáló hatását a *4.7. ábra* mutatja. Látható, hogy a 15°-os és 30°-os diffúzor valóban jelentősen stabilizálja a lángot.



4.7. ábra. A diffúzorok lángstabilizáló hatása [12].

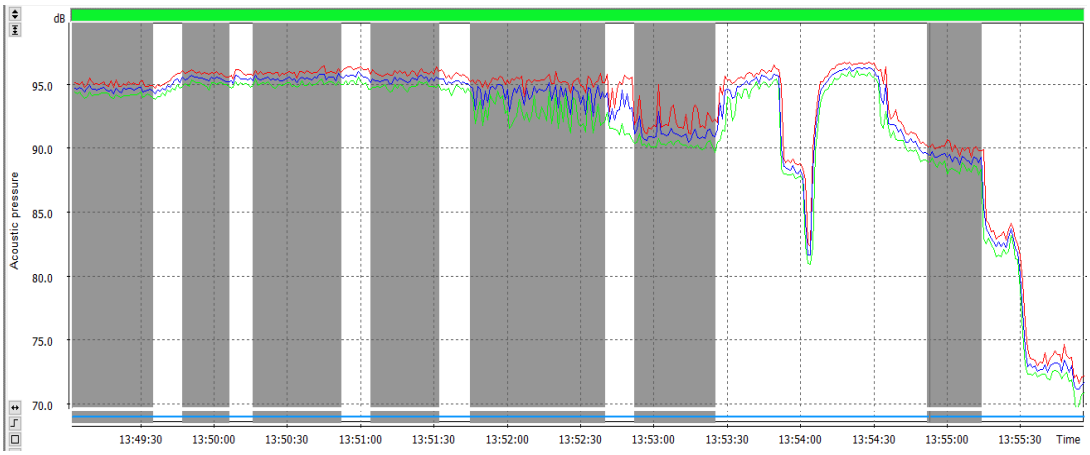
Észrevehetjük még a *4.6. ábra* kapcsán, hogy az eredeti kialakításnál éppen megjelent a bistabil lángalak, de a következő mérési pontban már leszakadt a láng, míg az összes többi esetben megjelent a bistabil és a V alakú láng is. Tehát hiába égett esetleg szűkebb perdület-paraméter tartományon a láng, kialakult a V alak, ha volt az égőn diffúzor.

A *4.8. ábra* az égés oszcillációját jellemző maximális és minimális egyenértékű hangnyomásszint görbék különbségét tartalmazza különböző diffúzorok esetén. Itt nem a pontosan összetartozó mérési beállítások szerepelnek, mivel ennek a diagramnak az információtartalma akkor teljes, ha minden lángstabilitási szakasz megjelenik. Tehát olyan beállítások értékeit láthatjuk, ahol megjelent mindegyik lángstabilitási fázis és a különbségek nagyjából hasonló nagyságrendbe estek, tehát jól látszanak az alakok. A görbék lefutása hasonló jelleget mutat, mint a reprezentatív esetnél. Valahol a bistabil és V alak között, a határhoz közelebb megjelenik a csúcs, aztán csökken az oszcilláció, de annyira nem esik vissza, mint egyenes lángalaknál volt.



4.8. ábra. Az oszcilláció a perdület-paraméter függvényében különböző diffúzorok esetén, A (fent) és Z (lent) szűrős adatokra.

Az egyetlen kitűnő eset a többi közül a 0°-os diffúzor, ahol a bistabil lángalak megjelenésénél van az oszcilláció kiugró értéke. A mögöttes információkhoz hozzátartozik, hogy itt is a két mérési pont között lett bistabil, így annál a maximumnál már egy „ideje" bistabil volt, miközben növeltük az égéslevegő térfogatáramát, valamint a V alakot is hamarabb elérte, mint ami ebből látszik. (Az utolsó tisztán egyenes lángalak 16 m^3/h égési levegő térfogatáramnál volt, az első bistabil mérési beállítás 18 m^3/h-nál, a bistabil szakasz pedig 17,5 m^3/h-nál jelent meg, valamint az utolsó bistabilként kiértékelt beállítás 20 m^3/h-nál volt, az első tisztán V alakú 22 m^3/hnál, de már 21 m^3/h-nál kialakult a stabil V alak.) Tehát a csúcs nem pont a bistabil elején van és a V alak nincs ilyen „messze" tőle, de az tény, hogy nem pont olyan, mint a többi. A 0°-os esetben több mérési beállításnál is rendellenesnek tűnik a zaj. A *4.9. ábra* a fenti diagramokon ábrázolt mérési beállítás hangfájljának képét mutatja a kijelölt mérési pontokkal együtt.



4.9. ábra. 0°-os diffúzor hangfájlja 0,427 barg porlasztónyomás esetén.

Látszik, hogy az ötödik mérési ponton igen erősen ingadozik az egyenértékű hangnyomásszint, ezt a kiugró értéket látjuk a *4.8. ábra* diagramjain. A 0°-os diffúzor (keverőcső megtoldása) esetén több ponton is hasonló képet látunk a hangfájlokban. Ennek az oka még nem tisztázott, azonban látjuk, hogy igazából a minimális egyenértékű hangnyomásszint (*4.9. ábra* zöld görbéje) ingadozik erősen, mint ha nagyon lefelé akarna menni, és ez okozza a kiugró értékeket. Korábban láttuk, hogy ez a V alak megjelenésével hozható összefüggésbe. A későbbiek folyamán érdemes ezt a mérést jobban kiértékelni, akár újra el is végezni, hogy megbizonyosodjunk, hogy nem valami egyéb körülmény miatt állt elő ez a jelenség.

Feltűnhet még a Z és A szűrős eseteket összehasonlítva, hogy néhol a reprezentatív esethez hasonlóan a kiugró csúcs közel ugyanakkora a két szűrő esetén, néhol pedig jelentősebb eltérés van (leginkább a diffúzor nélküli, 0° és 15° esetekben). Mivel az A szűrős esetben, ha hasonló is a két érték, legalább egy kicsit mindig magasabb, néhol pedig kiugróan magas, ebből arra következtetek, hogy ennek az oka is a spektrális analízis során található majd később meg.

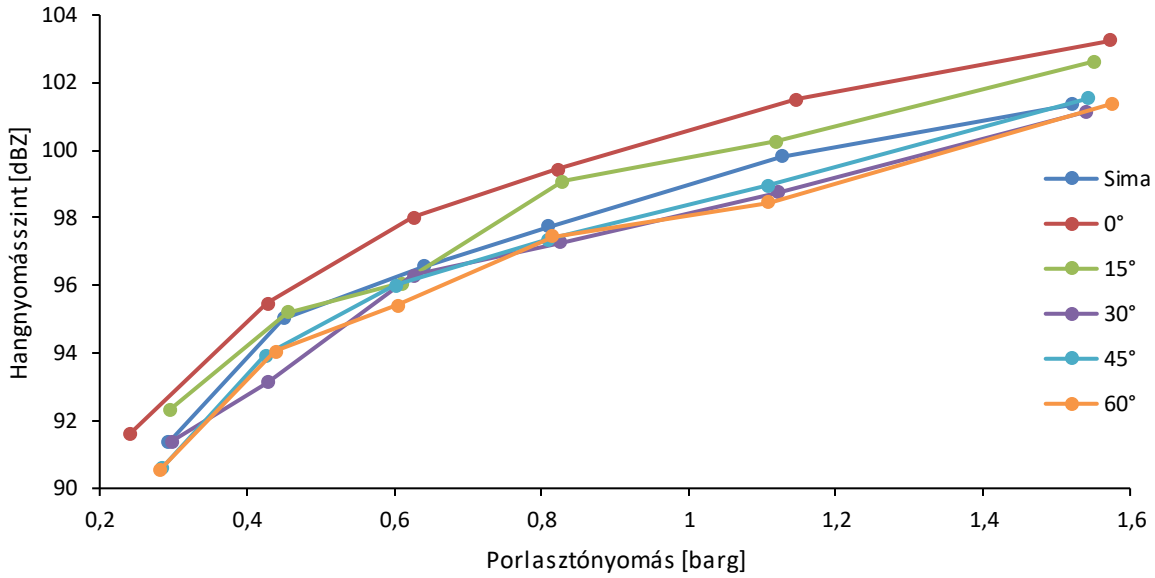
4.2. A porlasztónyomás és a diffúzor hatása

Az előző alfejezetben megnéztük, hogy a lángalak, illetve az ezzel összefüggésben álló perdület-paraméter hogyan befolyásolja az égési zajt, most pedig a porlasztónyomás hatását fogom elemezni, valamint arra is választ kapunk, hogy a különböző diffúzorok hogyan befolyásolják az egyenértékű hangnyomásszintet.

Ehhez a vizsgálathoz összehasonlíthatóvá kellett tenni a különböző mérési beállításokat. Először is egy olyan diagramot készítettem, ahol az egyenes lángalakok esetén vizsgáltam a porlasztónyomás hatását, amit a *4.10. ábra* mutat. Ez úgy történt, hogy mindegyik diffúzor mindegyik mérési beállítása (porlasztónyomása) esetén kiválasztottam azt a mérési pontot, ahol az égési levegő térfogatárama 12 m^3/h volt, tehát az adott diffúzor esetén így a porlasztónyomás a változó, és mindegyik diffúzor ugyanazon beállításához tartozó érték szerepel a grafikonon.

A diffúzorok hatásának tekintetében elmondható, hogy egyenes lángalak esetén a 0°-os diffúzor (keverőcső megtoldása) szemmel láthatóan hangosabbá tette a berendezést, a 15°-os diffúzor is kissé hangosabb volt, majd az összes többi enyhén a diffúzormentes eset alatt halad, alig eltérve egymástól.

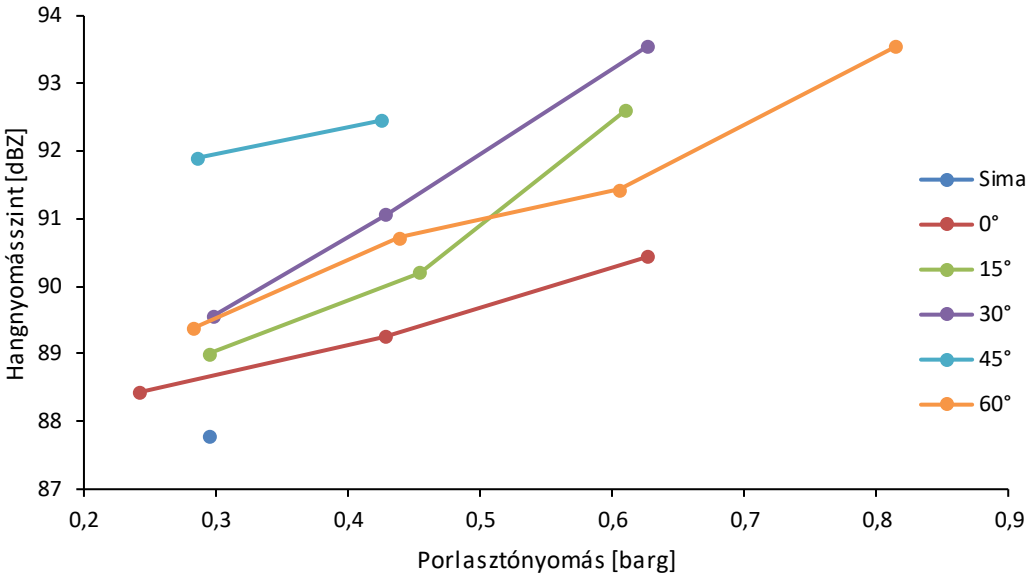
Azonban a következtetés mégis az, hogy a diffúzorok hatása itt egyenes lángalaknál nem annyira mérvadó, tekintve hogy a porlasztónyomástól mennyivel jobban függ a hangnyomásszint. Míg a különböző diffúzorok között maximum olyan 3 dBZ eltérés van adott porlasztónyomásnál, addig a porlasztónyomás növelése a legalacsonyabb és legmagasabb eset között átlagosan 10,55 dBZ növekedést eredményezett (minimum 9,75 dBZ, maximum 11,61 dBZ). Tehát egyenes lángalaknál a diffúzorok hatása nem biztos, hogy annyira mérvadó, hogy ez legyen a prioritás, mivel a lángstabilitást és lángalakot jobban befolyásolják, ami mint láttuk a zajra is nagyobb hatással van.



4.10. ábra. Összetartozó egyenes lángalakok hangnyomásszintje a porlasztónyomás függvényében.

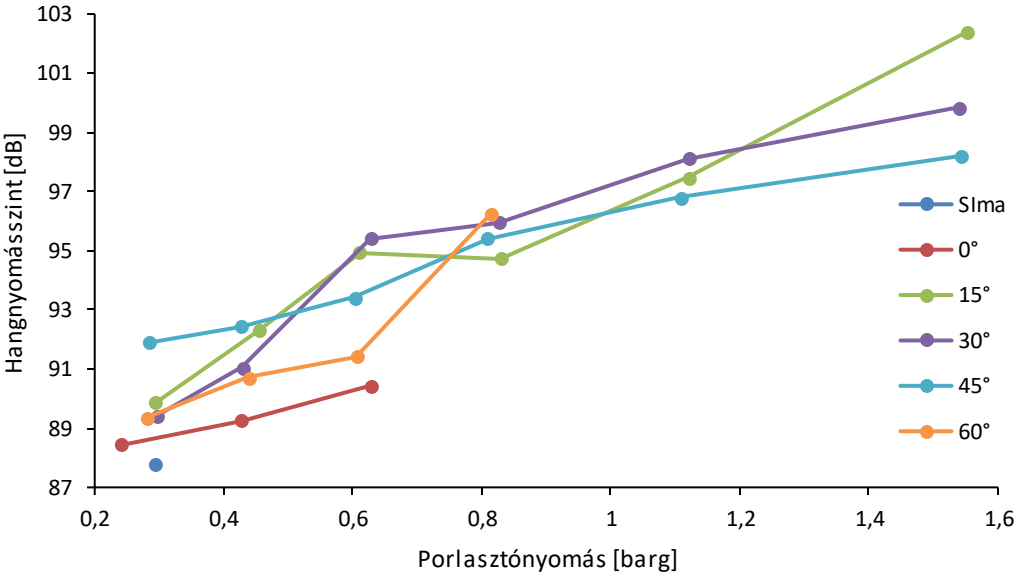
Érdemes ezt az összehasonlítást elvégezni a V alakra is. Bistabilra azért nem, mivel az egy olyan állapot, ahol mindegyik eset számos dologban különbözhet egymástól, így nem feltétlenül összehasonlíthatóak. V alakra viszont az előző metódussal elég nehézkes az ábrázolás. Találni kell egy olyan égéslevegő térfogatáramot, ahol minden (vagy a lehető legtöbb) mérési beállításnál már kialakult a V alakú láng. Ez sajnos hiányosan kivitelezhető. Az ugyanilyen módszerrel készített diagramot mutatja a *4.11. ábra*, ahol a kiválasztott égéslevegő térfogatáram 22 m^3/h.

Ha mellőzzük azt, hogy mennyire hiányos az előzőhöz képest a grafikon, akkor láthatjuk, hogy ebben az esetben maximum 4 dBZ körüli eltérés van az egyes diffúzorok között, de ennél az esetek nagy részében kevesebb, míg a porlasztónyomás növekedésével itt is általában meredeken nő a hangnyomásszint. A diffúzorok hatása azonban annyiban különbözik, hogy míg az egyenes lángalaknál a 0°-os esetben megugrott a hangnyomásszint, majd növelve a nyílásszöget visszacsökkent, addig itt növekszik a diffúzor nyílásszöggel, majd csak a 60°-os esetben van egy visszaesés.



4.11. ábra. Összetartozó V alakú lángok hangnyomásszintje a porlasztónyomás függvényében.

Érdemes megjegyezni, hogy ez a diagram is nyújt információt a diffúzorok stabilizáló hatásáról. Míg a diffúzormentes esetben gyakorlatilag ez volt az utolsó mérési pont, és az egyetlen ahol V alak jelent meg, addig a diffúzoros esetekben már szélesebb porlasztónyomás tartományon volt stabil V alak ugyanolyan égéslevegő térfogatáram mellett. Elkészítettem még a *4.11. ábra* egy olyan verzióját, ahol lángalakra tekintet nélkül felvettem a pontokat 22 m^3/h –ás égéslevegő térfogatáramhoz.



4.12. ábra. Hangnyomásszint a polrasztónyomás függvényében 22 m^3/h égéslevegő térfogatáramnál, különböző diffúzorokkal.

4.3. Stabilitási térképek

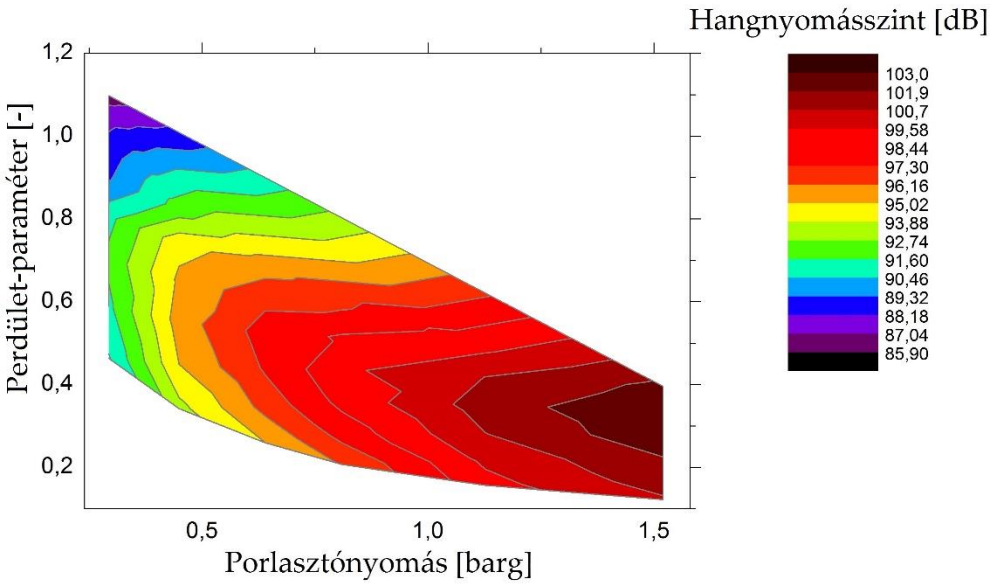
A kiértékelés utolsó részeként stabilitási térképeken ábrázolom az eredményeket. A korábbi következtetéseket ismerve ez az alfejezet mintegy összefoglalásként szolgálhat, kicsit komplexebb formában megjelenítve az egyes üzemi paraméterek egymással való kapcsolatát.

A stabilitási térképek, amiket készítettem három paramétert tartalmazó diagramok. A diffúzor nélküli esetet a *4.13. ábra* szemlélteti. Vízszintes tengelyen van a porlasztónyomás, függőleges tengelyen a perdület-paraméter, a színskála pedig az adott pontban mért közepes egyenértékű hangnyomásszintet (LZFeq) jelzi. Az eredmények jobb megértéséhez tekintsük a *4.2. táblázatot*, melyben az adott porlasztónyomáshoz tartozó első V alakú beállítás értékeit tüntettem fel. A táblázat kihúzott értékeinek az információtartalma, hogy adott porlasztónyomáson nem volt stabil V alakú láng.

4.2. táblázat. A diffúzormentes eset első V alakú lángot eredményező beállításai.

Diffúzor	p_{porl} [barg]	S [-]	LZFeq [dBZ]
Nincs	0,294	0,896	89,226
	0,449	-	-
	0,640	-	-
	0,810	-	-
	1,126	-	-
	1,520	-	-

Amit látunk, az a teljes, diffúzor nélküli mérési beállítás minden mérési pontját tartalmazó diagram. Adott porlasztónyomásnál elmetszve megkapjuk az egy mérési beállításhoz tartozó görbét lényegében (olyanokat, mint a *4.2. ábra*).

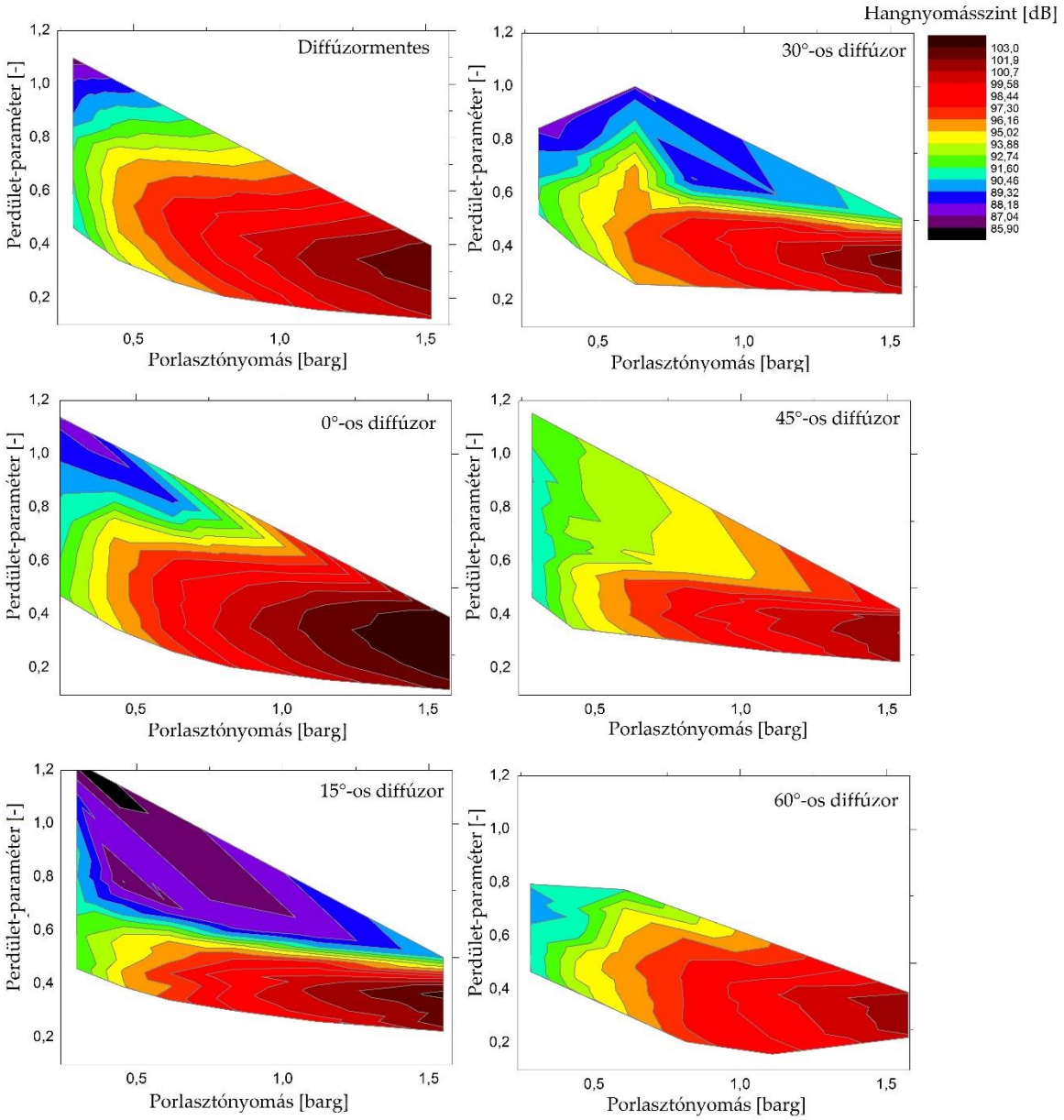


4.13. ábra. Stabilitási térkép a diffúzor nélküli esetre.

Ahogy azt a *4.2 alfejezetben* megállapítottam, a porlasztónyomás erősen növeli a hangnyomásszintet, mely a fenti diagramon is jól látható. A gyengén perdületes (~$S < 0{,}6$) eseteknél, alacsony perdület-paraméter esetén láthatóan ez a meghatározó

folyamat. Ahogy haladunk az erősen perdületes áramlások felé látszik, hogy $S > 0{,}6$-$0{,}7$ felett a hangnyomásszint rohamosan elkezd csökkenni, ami a lángalakváltással áll összefüggésben. A *4.2. táblázatba* gyűjtött adatok alapján ugyan itt V alakú majd csak $S = 0{,}9$ fölött lesz a láng, de már előtte is látható a bistabil szakasz csökkenő hangnyomásszintje.

Érdemes megnézni valamennyi diffúzor esetén ezeket az összefoglaló stabilitási térképeket, mivel a korábban végigvett következtetések remekül látszanak bennük. A *4.14. ábra* tartalmazza valamennyi diffúzor stabilitási térképét, a következőken ezekről szólok néhány szót.



4.14. ábra. Stabilitási térképek.

A *4.3. táblázat* tartalmazza mindegyik stabilitási térképhez az első V alakú beállítást. Itt is megjelennek a kihúzott cellák, melyek célja, egyrészt, hogy következetes és teljes legyen a táblázat, másrészt hogy rögtön kapjunk információt az egyes diffúzorok stabilizáló hatásáról.

4.3. táblázat. A stabilitási térképekhez tartozó, első V alakú beállítást megjelölő táblázat.

Diffúzor	pporl [barg]	S [-]	LZFeq [dBZ]	Diffúzor	pporl [barg]	S [-]	LZFeq [dBZ]
Nincs	0,294	0,896	89,226	30°	0,297	0,713	89,438
	0,449	-	-		0,428	0,675	91,066
	0,640	-	-		0,627	0,767	93,552
	0,810	-	-		0,826	0,572	93,311
	1,126	-	-		1,121	0,540	92,779
	1,520	-	-		1,540	0,448	97,497
0°	0,242	0,942	89,508	45°	0,285	0,980	90,914
	0,427	0,906	89,261		0,426	0,676	92,455
	0,627	0,693	94,102		0,602	0,637	94,014
	0,822	-	-		0,809	0,576	94,415
	1,147	-	-		1,108	0,513	95,239
	1,574	-	-		1,544	-	-
15°	0,295	0,896	90,844	60°	0,282	0,724	89,959
	0,454	0,662	90,210		0,439	0,670	90,724
	0,610	0,603	92,606		0,605	0,774	91,439
	0,829	0,571	91,307		0,815	-	-
	1,120	0,540	90,480		1,109	-	-
	1,550	0,474	92,990		1,575	-	-

A 0°-os esetben ugyan nagyon hasonló a stabilitási térkép a diffúzormenteshez, ám ami szembetűnő lehet, hogy a bal felső sarokban jelentősebb területen vannak alacsony hangnyomásszintek. A *4.3. táblázat* adatait mellé nézve láthatjuk, hogy a kékes terület jó közelítéssel a V alakú tartományt jelöli. Tehát a 0°-os félkúpszögű diffúzort rárakva az égőre szemmel látható stabilizálódás történt. Minden stabilitási térképen azonos skálázást választottam, így egymás mellé rakva őket valóban láthatóvá válik, hogy melyik beállítás milyen határok között volt képes égni.

A 15°-os eset stabilitási térképe szemmel láthatóan drasztikusan eltér a többitől. A *4.3. táblázatot* mellé nézve valóban láthatjuk, hogy már $S = 0{,}5$-ös perdület-paraméter értéknél megjelenik a V alakú láng. Előtte a sok sűrű sáv egy rövid bistabil tartományt jelez. Ezen diffúzor esetén a stabilitási tartomány jelentős részén volt V alakú láng, mely itt tökéletesen látszik. Korábban a *4.7. ábra* kapcsán is ezt a következtetést vonhattuk le, tehát a két kiértékelési eredmény jól korrelál.

A 45°-os félkúpszögű diffúzor esetében feltűnhet, hogy a korábban látott kékesebb területek, melyek már a V alakot mutatták, itt hiányoznak, azonban a *4.3. táblázat* adataiból mégis látszik, hogy itt is jelentős tartományon volt V alakú láng. A színskála is azonos minden diagramon, így rögtön látható a következtetés, hogy ennél a diffúzornál a V alakú láng nagyobb hangnyomásszint mellett valósult meg (erre utal a *4.11. ábra* is tulajdonképpen). Az eltérés nem minden nyomáson jelentős, de általában ez a konstrukció hangosabb, mint a többi.

5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

A dolgozatom során tehát egy szabadtérben égő, LPP rendszerű gázturbina által keltett zajt vizsgáltam. Az egyenértékű hangnyomásszintek átlagolásával 6 különböző diffúzor 6 különböző porlasztónyomású mérési beállításának egyenként 6-11 mérés pontjához határoztam meg a minimális-, maximális és közepes egyenértékű hangnyomásszintet a mikrofonos felvételek alapján. Elkészítettem az átlagolást Z illetve A szűrős adatsor alapján is. A meghatározott számos átlag és ezek adott mérési pontbeli eltérése alapján több következtetést is levontam.

Egyrészt megállapítottam, hogy a perdület-paraméter által befolyásolt lángalak milyen hatással van az egyenértékű hangnyomásszintre és annak ingadozására. Láthatóvá vált, hogy a V alakú láng határozottan halkabb, mint az egyenes, ugyanakkor a hangnyomásszint ingadozása számottevőbb. A bistabil szakaszon növekvő oszcilláció, melyet a két, eltérő hangnyomásszintű láng periodikus váltakozása ad, szintén kimutatható volt. A bistabil tartomány és V lángalak határán igen erős oszcilláció volt tapasztalható, melyre szintén magyarázatot adtam.

A porlasztónyomás és a diffúzorok hatásának vizsgálata során megállapítottam, hogy a diffúzorok hatása másodlagos az alkalmazott porlasztónyomás hatásához képest, ezek szerepe inkább a lángalak meghatározásánál jelentős. A porlasztónyomás tekintetében azonban láthatjuk, hogy a növekedésével jelentősen nő a hangnyomásszint.

A kiértékelés során megvizsgáltam az A szűrővel feldolgozott adatokat is és ezek kapcsán is vontam le következtetéseket. Mivel ezen értékek hatása a hang fizikai folyamatokra való hatásával nem hozható összefüggésbe, ezért inkább az emberi környezetre való hatásról kaphatunk információkat. Ezen kívül, mivel a kapott görbék rendszerint a változóktól (például a perdület-paramétertől, mely a lángalakkal van erős összefüggésben) jobban függnek, egy esetleges diagnosztikai rendszer felállításánál válhatnak hasznossá.

A dolgozatnak külön nem volt célja a kapott görbék alapján a különböző paraméterek, diffúzorok stabilizáló hatását vizsgálni, azonban néhol tettem utalást rá, hogy ennek kapcsán is informatívak az eredményül kapott diagramok.

Fontos kiemelni, hogy ez a munka a kutatás első eredményeit, kezdeti vizsgálatait tartalmazza, ezért mindenképp ejtek néhány szót a továbblépési lehetőségekről. A továbbiakban mindenképpen sor fog kerülni a hangfelvételek spektrális analízisére. A hangfájlok részletes információt tartalmaznak a zaj spektrális összetételéről, és ezek elemzése fontos segítséget nyújt az eddigi eredmények további magyarázásához és a jelenségek pontosabb megértéséhez. A spektrális elemzést első közelítésben Fourier transzformáció segítségével fogjuk elvégezni, majd az ún. Wavelet transzformáció segítségével is megvizsgáljuk.

Továbblépési lehetőség még a mérési sorozat egyéb aspektusaiból való kiértékelésével összehasonlítani ezeket az eredményeket. A diffúzorok stabilizáló hatásáról ké-

szült tanulmány ezen mérési sorozat eredményeiből, így ha a mellé tennénk az itt szerzett ismereteket, akár akusztikai szempontból is megpróbálhatnánk megállapítani, hogy milyen diffúzort érdemes alkalmazni.

6. FORRÁSJEGYZÉK

[1] T. Szentmártony and I. Kurutz, *A műszaki akusztika alapjai*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1982.

[2] L. L. Beranek and I. L. Vér, Eds., *Noise and vibration control engineering - Principles and applications*. John Wiley & Sons Inc., 1992.

[3] Studiotips honlap. [Online]. (Legutolsó letöltés: 2016.10.17.) Available: http://forum.studiotips.com/viewtopic.php?f=1&t=3806.

[4] I. Barótfi, *Környezettechnika*. Mezőgazda Kiadó, 2000.

[5] W. C. Strahle, "Combustion noise," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 4, pp. 157–176, 1978.

[6] A. Lefebvre, D. Ballal, and D. Bahr, *Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions*. 2010.

[7] Y. Huang and V. Yang, "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 35, no. 4, pp. 293–364, 2009.

[8] J. Rayleigh, *The theory of sound*, 2nd ed. New York: Dover, 1945.

[9] J. C. Broda, S. Seo, R. J. Santoro, G. Shirhattikar, and V. Yang, "An experimental study of combustion dynamics of a premixed swirl injector," in *Symposium (International) on Combustion*, 1998, vol. 27, no. 2, pp. 1849–1856.

[10] J.M.Beér and N.A.Chigier, *Combustion Aerodynamics*. Robert E. Krieger Publishing Companiy, 1983.

[11] M. Stöhr, I. Boxx, C. D. Carter, and W. Meier, "Experimental study of vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor," vol. 159, pp. 2636–2649, 2012.

[12] G. Hidegh and V. Józsa, "Diffúzor alkalmazása perdületes égő lánglefúvási stabilitásának növelésére," *Energiagazdálkodás*, vol. 57, no. 3–4, pp. 17–20, 2016.

7. FÜGGELÉK

A mérés feldolgozása és kiértékelése során használt összes adatot tartalmazó táblázat meghaladja azt a méretet, ami egy A4-es oldalra ráfér, viszont ahelyett, hogy több kisebb táblázatra szétszedjem, inkább azt a megoldást választom, hogy létrehoztam egy Google Táblázatot. A következő link segítségével elérhető minden adat:

https://goo.gl/5QKbuf

A táblázat első oszlopában megjelöltem, hogy a 6 diffúzor közül melyiknek az adatai láthatóak. A másodikban a diffúzoronkénti 6 porlasztónyomást jelölöm. A negyedik oszlopban az adott mérési pontnál a lángstabilitási fázist írtam. Megjegyzendő, hogy a bistabil szakasz nem lángalak, hanem egy átmeneti állapot, de a táblázat keretei miatt az oszlop neve Lángalak. Ezek után rendre a leolvasott porlasztólevegő térfogatáram, égéslevegő térfogatáram, a számított perdület-paraméter, ennek abszolút hibája, relatív hibája. Majd a Z szűrős adatok: egyenértékű hangnyomásszint maximális, minimális és közepes átlagértéke, a maximális és közepes, közepes és minimális, maximális és minimális különbsége. Ez után az A szűrős adatok ugyanígy. Az adott diffúzorhoz és porlasztónyomáshoz tartozó rész egymást követő sorai az égéslevegő térfogatáramát növelve álltak elő a mérés során.