MŰEGYETEM 1782

Perdületes dízelolaj láng akusztikai karakterisztikájának vizsgálata

Novotni Gergely István

Tudományos Diákköri Konferencia

Témavezető: Dr. Józsa Viktor

A DOLGOZAT AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTÉRIUMA ÚNKP-17-2-I KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

2017

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés és célkitűzés 1

2. Irodalmi áttekintés 2

2.1. Akusztikai bevezetés 2

2.2. Lángakusztika és akusztikai eredetű égési instabilitás 3

2.3. Spektrális elemzés 7

2.4. Perdületszám és lángalak 10

2.5. Korábbi eredmények 11

3. Mérés és az eredmények értékelése 12

3.1. A mérőrendszer és a mérés menete 12

3.2. Mintavételezés, adatfeldolgozás, hibaszámítás 14

3.3. Különböző lángalakok spektrumai 16

3.4. Spektrális csúcsok vizsgálata 24

3.5. Csúcsok vizsgálata valószínűségsűrűség-függvénnyel 28

3.6. Az egyenértékű hangnyomásszint kapcsolata az égés paramétereivel 36

4. Összefoglalás 44

5. Summary 46

6. Felhasznált irodalom 48

7. Függelék 50

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A korszerű tüzelőberendezések esetén az emissziócsökkentési törekvések miatt egyre szegényebb keverékekkel tüzelünk, ám új problémák merülnek fel. Ilyen az akusztikailag gerjesztett égési instabilitások jelensége, melynek pontosabb megismeréséhez a lángakusztikai diagnosztika nyújt segítséget. A tavaly megkezdett kutatásom folytatásaként készítem el az idei dolgozatomat, jobban elmélyülve az akusztikai és üzemi paraméterek kapcsolatának feltárásában.

További vizsgálatokat végeztem az egyenértékű hangnyomásszint és a perdületszám kapcsolatának megismerése érdekében, illetve belekezdtem a zaj spektrális elemzésébe. Ennek kapcsán vizsgáltam, hogy miként változik a spektrum a láng alakjától függően, valamint mik az egyes állapotokra jellemző csúcsfrekvenciák, illetve valószínűségsűrűség-függvényekkel elemeztem a csúcsoknál tapasztalható statisztikus viselkedést.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Akusztikai bevezetés

A hang a vivőközeg állapotának hullám formájában terjedő elemi ingadozása, azonban a változó állapotjelzők (pl.: sebesség, sűrűség, hőmérséklet) közül szinte mindegyik olyan kicsi, hogy a gyakorlati életben a mérésük nehézségekbe ütközik. A leginkább mérhető változás a nyomás ingadozásában van, melyet mikrofonokkal tudunk mérni. A légköri 10^5 Pa körüli nyomáshoz képest a hanghullám nyomásingadozása nagyságrendekkel kisebb. Az emberi fül hallásküszbe 10^{-5} Pa nagyságrendű, a fájdalomküszöb pedig mindössze 20 Pa nyomásingadozáshoz tartozik [1].

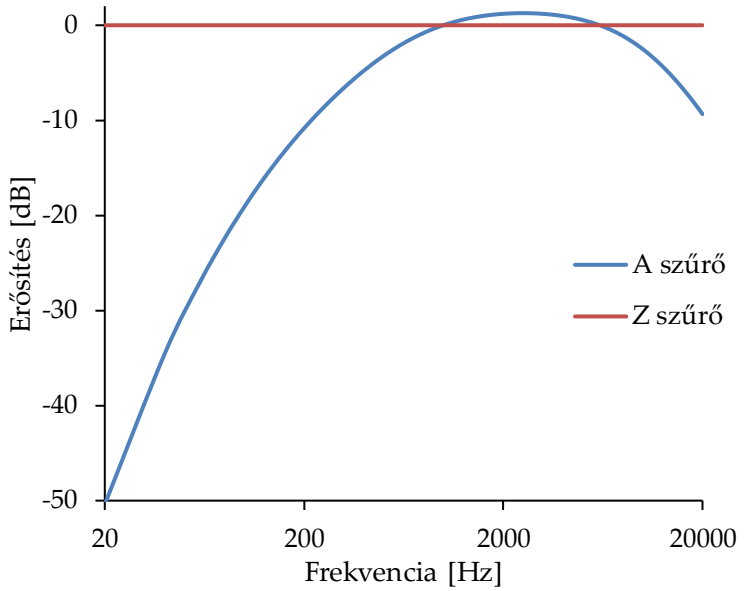
A nyomásingadozás értékének széles tartománya miatt ezt logaritmikus skálán ábrázoljuk, ezért szintekről beszélünk, a nyomásingadozást pedig egy referencia nyomásértékhez viszonyítjuk, mely az általános emberi hallásküszöb. A meghatározásra szolgáló összefüggés a következő:

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

ahol $p(t)$ a hangnyomás [Pa], p_{ref} pedig a referencia hangnyomás ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa), L_p pedig a hangnyomásszint [dB]. Látható, hogy így 0 dB lesz a referencia hangnyomáshoz tartozó szint, valamint 20 dB 10-szeres, 40 dB 100-szoros eltérést jelent, a negatív értékek pedig a referencia szintnél kisebb hangnyomásokhoz tartoznak [2].

A hangnyomás esetén azt mérjük, hogy a tér egy adott pontjában milyen mértékű zavarást okoz a forrás, vagy a források, emiatt számít a távolság, a levegőben való veszteség, valamint zárt tér esetén a geometriai és egyéb akusztikai jellemzők [2]. Ha mikrofonnal hangot veszünk fel, akkor a készülék jellemzően egy egyenértékű hangnyomásszintet számol nekünk, mely megmutatja, hogy az integrálási idő alatt mi az az egyetlen dB értékkel jellemezhető hangnyomásszint, amely helyettesítheti a tér adott pontjában az ingadozó hangnyomásszintet.

A hangfelvételek készítésekor szűrőket szoktak alkalmazni, melyek arra használhatók, hogy az emberi érzékelésnek megfelelő eredményt kapjuk, mivel a hallásunk frekvenciatartományának (20 – 20 000 Hz) szélei felé kevésbé halljuk a hangokat. Az emberre gyakorolt hatás jellemzésére szabványosan az A szűrőt alkalmazzuk [3], ezen kívül a mérések kiértékelése során az úgynevezett Z (Zero) szűrős hangnyomásszintet használtam, mely a szűrő nélküli eset. Ha a hang fizikai hatásairól akarunk nyilatkozni, akkor ez elengedhetetlen, azonban az emberekre gyakorolt hatás miatt érdemes az A-szűrőt is vizsgálni. Az A és Z szűrős eredményeket rendre dBA, illetve dBZ mértékegységekkel láttam el. A *2.1. ábra* a két szűrő csillapítását mutatja a frekvencia függvényében.



2.1. ábra. Az A és Z szűrő esetén alkalmazott erősítés értéke a frekvencia függvényében.

2.2. Lángakusztika és akusztikai eredetű égési instabilitás

A tüzelőanyag-levegő keverék turbulens égését zaj kíséri, melynek keletkezése különböző kémiai, termodinamikai és áramlástani folyamatokra vezethető vissza. Egyéb, például kémiai szennyezőktől eltérően a zaj, hang azonnali hatást fejt ki azokra, akiket ér, így ingerültebbé tehet, csökkentheti a hatékonyságot és fiziológiai hatásai is lehetnek, adott esetben akár azonnali károsodást okozva. Hosszú távú hatásként károsíthatja a szerkezeteket és élettani károsodást is okozhat. A hang- és kémiai szennyezés két különböző tudományterülethez tartozik, azonban az égés által keletkezett zaj esetében ez a két terület átfedi egymást [4].

Tüzelőberendezések esetén két okra vezethető vissza a zaj keletkezése. Egyrészt ipari égőkben turbulens égés zajlik (a kialakuló nyomásmező nem állandó, hang keletkezik), másrészt hő szabadul fel. Az égési zaj a turbulencia és az égés kölcsönhatásából ered. Megjegyzendő, 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 a különböző kémiai és fizikai 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 égés folyamatára, de ez nem olyan erős, hogy fázisban lévő oszcillációvá váljon. Egy jól működő berendezés a bevitt energiának 10^{-6}-10^{-5} nagyságrendű részét bocsátja ki zajként, egy valóban instabil rendszer esetén ez akár 10^{-4} nagyságrendűvé is nőhet, mely a rendszer szempontjából elhanyagolható veszteség, azonban hatása igen jelentős [4].

Direkt égési zajnak nevezzük, ami egy bizonyos térfogatú gáz égés hatására való kitágulásakor jelentkezik. A gyors térfogatváltozás elindít egy nyomáshullámot (mely a térfogat-növekedés intenzitásától függ), ami tulajdonképpen a direkt égési zajként hallható hanghullám. Az ilyen jellegű forrásokat akusztikai monopólusnak nevezzük [5], ami esetén a nyomáslefutás térben szimmetrikus [4]. A szabadsugár zaját az

akusztikai kvadropólus jellemzi, mint a későbbiekben vizsgált rendszer esetén is megfigyelhető. A monopólus a Mach számmal arányosan, a kvadropólus pedig a Mach szám ötödik hatványával arányosan bocsát ki zajt, ebből következik, hogy kis teljesítménynél a monopólus (pl. sziréna) a zajosabb, nagy sebességeknél pedig a kvadropólus.

A tüzelőberendezések esetén hagyományosan diffúz lángot alkalmaztak, mivel a teljesítmény és a stabilitási karakterisztika is megfelelő volt, azonban az NO_x kibocsátás csökkentése érdekében ezen változtatni kellett. Az új tüzelési lehetőségek közül a jelentősebbek a szegény előkevert tüzelés (lean-premixed combustion (LPM) vagy folyadéknál gyengén előkevert, előpárologtatott, azaz lean-premixed prevaporized (LPP) combustion), a katalitikus tüzelés vagy a lépcsős (a szakirodalomban RQL: rich-burn quick-quench lean-burn) tüzelés. RQL esetén problémát jelent a koromképződés és nem megfelelő a keveredés a tüzelőanyagban dús rész utáni levegőbekeverésnél, a katalitikus tüzelésnél pedig a költségekkel és az élettartammal adódtak problémák. Jelenleg a gyakorlati alkalmazások terén az LPM és LPP rendszerek dominálnak [6].

Szegény előkevert tüzelés esetén a tüzelőanyag és a levegő egy keverőcsőben összekeveredik, mielőtt az égőtérbe jutna, valamint plusz hígító levegőt is vezethetünk be az égőtérbe, ezzel csökkentve az adiabatikus lánghőmérsékletet, így a termikus NOx képződést. Ekkor azonban jelentőssé válhatnak a kapcsolt instacionárius áramlási és égési folyamatok, ami tervezési probléma az LPM/LPP égők esetén. Ezen rezgések a berendezés módusaival interferálva akár az égőtér nyomásával összemérhető nagyságrendű nyomáslengéseket is okozhatnak, így a berendezés tönkremeneteléhez is könnyen vezethetnek. A *2.2. ábra* bal oldalán egy olyan földgázra tervezett égősor látható, mely a helytelen akusztikai kialakítás miatt kialakult nyomáslengés hatására ment tönkre, jobb oldalt pedig egy hasonló, új égősor van referenciaként [6].

2.2. ábra. Akusztikai eredetű égési instabilitás hatása [6].

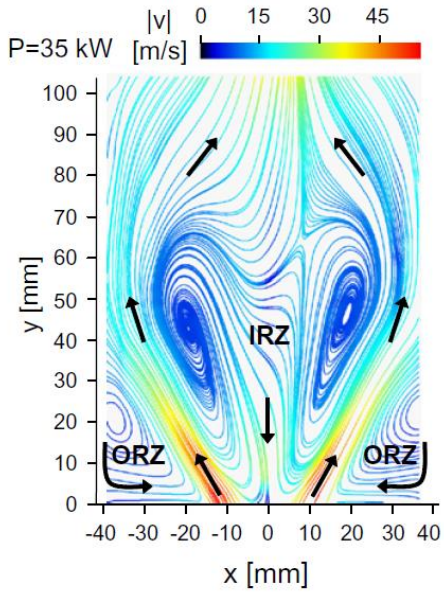
Ha az égés során a hőfelszabadulás periodikussá válik, akkor a kibocsátott hanghullámok is periodikusak lesznek. Ezek a hanghullámok az égőtér faláról visszaverődnek és végighaladnak a lángon. Ha a visszatérő nyomáshullám térben és időben fázisba kerül a lángban zajló hőfelszabadulással, akkor pozitív visszacsatolás alakul ki. 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, az oszcilláció erősödik. Ugyanakkor ha a hőt a legnagyobb ritkuláskor adjuk, vagy elvonjuk a legnagyobb sűrűsödéskor, az oszcilláció amplitúdója csökken [7]. 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 egészen addig, amíg a disszipáció miatt entrópianövekménnyé nem alakul. Hasonló metódus eredményeként, ha ellenkező fázisban (180°-os fáziseltolással) találkozik a két jelenség, akkor az amplitúdó csökkenni fog. Ez a Rayleigh kritérium, mely integrál formában a következőképpen írható fel [8]:

$$\frac{1}{T}\int_0^T p'(\boldsymbol{r},t)q'(\boldsymbol{r},t)\,dt, \tag{2.2}$$

ahol p' és q' rendre a nyomás és hőfelszabadulás, $\boldsymbol{r}$ a helykoordináta, t az idő, T a vizsgált időtartomány. Ha az integrál értéke pozitív, akkor a vizsgált helyen öngerjesztő termoakusztikus oszcillációt lokalizáltunk, negatív értékeke esetén pedig a disszipatív folyamatok dominálnak. Az így kapott térbeli eloszlást ha integráljuk tovább a teljes vizsgálati tartományon, akkor megkapjuk azt, hogy eredően a lángunk disszipatív, öngerjesztő, vagy semleges viselkedést mutat. Noha a valóságban ez utóbbi eset a pillanatszerű volta miatt nem érhető nyomon.

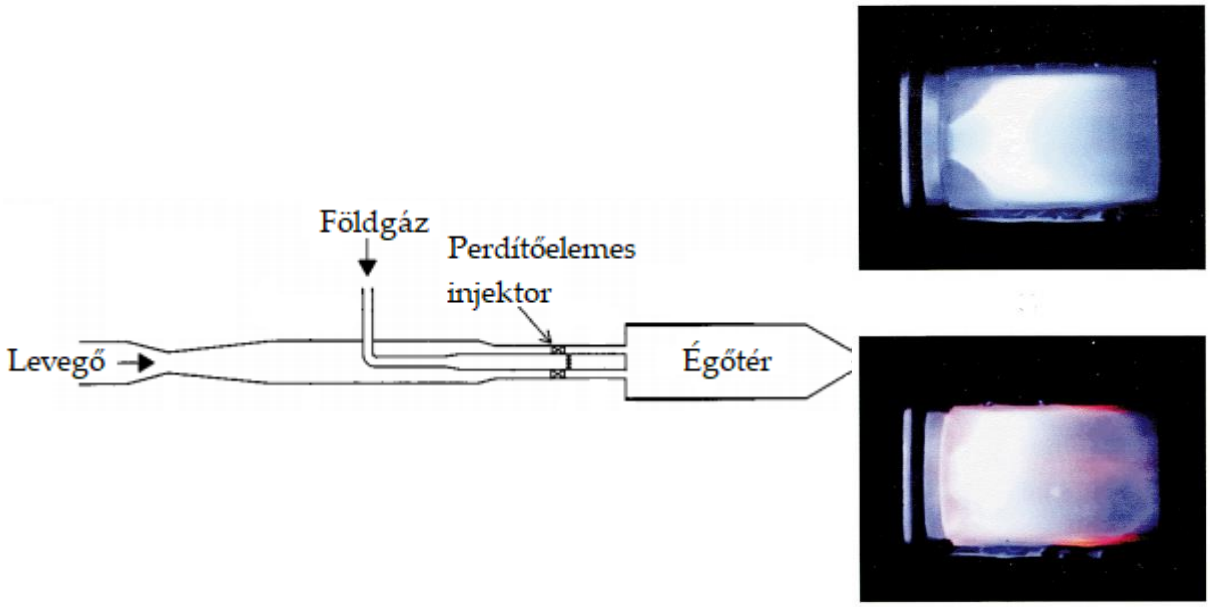
Az LPM/LPP tüzelőberendezéseknek számos tulajdonsága van, ami hajlamossá teszi őket az áramlásingadozásra. Egyrészt a rendszer általában az alsó gyulladási határ körül működik, emiatt egy kisebb zavarás a légfelesleg-tényezőben nagyban befolyásolhatja a felszabaduló hő mennyiségét, ami ha rezonanciába kerül az égőtérben lévő akusztikai hullámokkal, erős égési instabilitásokat, lengéseket eredményezhet. Másrészt az előkevert égőterekben, kiváltképp a sugárhajtóműveknél, 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 hőfelszabadulás és az áramkép között. Továbbá, mivel a lángot aerodinamikailag indukált recirkuláló áramlások stabilizálják, egy erősebb áramlásingadozás az áramlás megfordulását és akár visszaégést is okozhat, a lángot ellenáramban a tüzelőanyag porlasztók felé hajtva [6]. Az *2.3. ábra* mutatja, hogy ez a stabilizáló áramlás hogyan helyezkedik el az áramláson belül (IRZ – Inner Recirculation Zone) és kívül (ORZ – Outer recirculation Zone).



2.3. ábra. Külső és belső recirkulációs zóna.

Az égési instabilitás egy adott gázturbina esetén az oszcilláció frekvenciája alapján lehet alacsony-, közép- és magas frekvenciájú, azonban nincsenek egységesen elfogadott határok ezek elkülönítésére. Az alacsony frekvenciás instabilitások a 30-50 Hz alattiak és gyakran a kezdődő lefúvási jelenséghez köthetőek. Nevezik őket „hideg hangoknak" (cold tones) is, mivel az amplitúdójuk növekszik, ahogy a lánghőmérséklet csökken. 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. 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 [6].

Broda és munkatársai [9] végeztek kísérletet perdület-stabilizált égés kapcsán. A rendszer (*2.4. ábra*) egy perdületes injektorból, egy tengelyszimmetrikus égőtérből és egy fojtott fúvókából állt. Földgázt juttattak be radiálisan 10 furaton át a levegőáramba a perdítőelem után közvetlenül, így 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 is mutat, melyeknél a stabil és instabil égés közötti jellemző különbségeket figyelhetjük meg. A jobb felső a stabil (570 K belépő levegőhőmérséklet), a jobb alsó az instabil égés (660 K belépő levegőhőmérséklet), 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, erősen lumineszcensé. A sarokban lévő recirkulációs zónában az instabil esetben égőképes keverék jut, míg stabil esetben ott nem játszódik le kémiai reakció [6]. Taamallah és munkatársai hasonló jelenséget vizsgáltak, szintén földgáztüzelés mellett [10].



2.4. ábra. A mérési elrendezés (balra), valamint stabil (jobbra felül) és instabil (jobbra alul) égés [9].

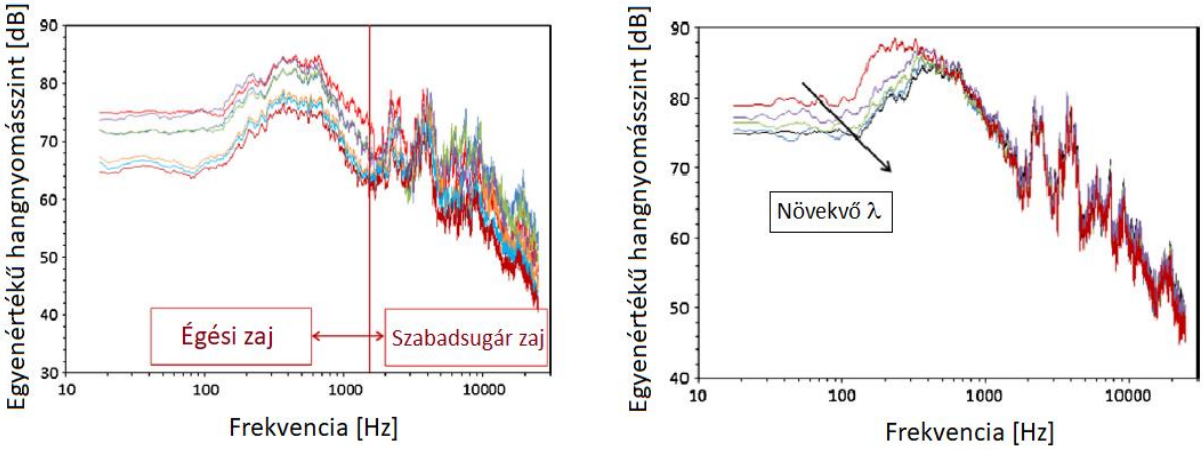
2.3. Spektrális elemzés

A turbulens lángok spektrális vizsgálata, különösen a folyadéktüzelés esetén kevéssé kutatott terület, holott érdemesebb nagyobb figyelmet fordítani rá, mivel a zajkibocsátás spektrális ismerete segíthet megérteni, lokalizálni és csillapítani a tüzelés során fellépő zajt. Az üzembiztonság mellett a spektrális összetevők ismerete a zavaró hatás csillapításához is hozzájárulhat [11].

Singh és munkatársai [11] igen részletes vizsgálatot folytattak egy nem előkevert propán lánggal, koncentrikus, perdületes égőben. A vizsgálat során állandó égéslevegő tömegáram mellett folyamatosan változtatták a tüzelőanyag mennyiségét, így változtatva a légfelesleg-tényező értékét. Több mikrofont helyeztek el a láng környezetében. Néhány mérésük spektrumát mutatja a *2.5. ábra.*

A bal oldali diagramon a különböző helyeken lévő mikrofonok által egy időben készített felvételek spektrumai látszanak, a jobb oldali pedig különböző légfelesleg-tényezőjű eseteket mutat (rendre 1,43 - 1,25 - 1,11 - 1 és 0,91). Az égési zaj jellemzően 1500 Hz-ig tart, e fölött a szabadsugár zaja dominál. Látható, hogy a légfelesleg-tényező befolyásolja a különböző összetevők hangnyomásszintjét, de a karakterisztikán nem változtat, tehát érdemes a spektrumot vizsgálni és összefüggéseket keresni az üzemi paraméterekkel [11].

Vizsgálatuk során azt tapasztalták, hogy a spektrális összetevők amplitúdója a frekvenciával nő egészen addig, amíg el nem érnek egy csúcsfrekvenciát, majd ez után a frekvenciával folyamatosan csökken a komponensek amplitúdója. A spektrális karakterisztikát függetlennek találták a légfelesleg-tényezőtől és az áramlás sebességétől, míg maga az égési zaj egyenértékű hangnyomásszintje függ ezektől [11]. Mások kutatásai azt mutatják, hogy a csúcsfrekvencia égési zaj esetén a 200-1000 Hz-es tartományba esik [12, 13], azonban tapasztaltak már többszörös csúcsokat is [14], noha a többszörös csúcsok esetén mérlegelni kell, hogy a vizsgált geometria akusztikája, vagy a kapcsolódó hatások okozhatják-e azokat [11].

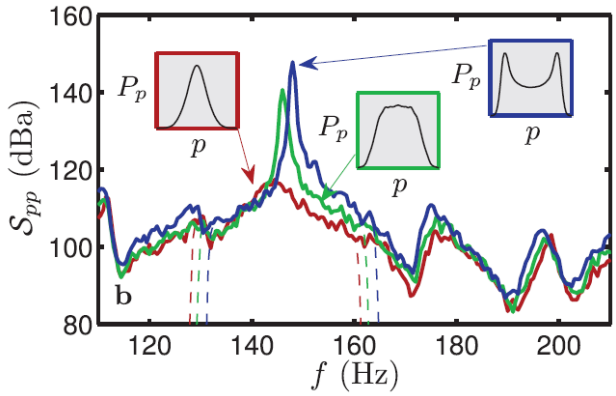


2.5. ábra. Diffúz, perdületes propán láng akusztikai spektruma [11].

Esetükben az égési zaj 100-1500 Hz között volt jellemző, melyet úgy definiálnak, hogy az égő keverék spektrumában az amplitúdó ezen a tartományon nagyobb, mint az égés nélkül áramló tüzelőanyag-levegő keveréknek, ahol nem így van, azt a részt nevezik szabadsugár zajnak. A távolabbi mikrofonok esetén alacsonyabb amplitúdójúak voltak a komponensek (*2.5. ábra* bal oldali diagram). Mivel a mikrofonok egy keretre voltak erősítve és függőleges irányba távolodtak el a lángtól (a középvonaltól mindig ugyanolyan messze voltak), ezért ez azt jelzi, hogy az akusztikai forrás közel van az égőszájhoz, ahol instacionárius hőfelszabadulás zajlik az égés hatására [11]. A szabadsugár zaja szintén csökken, mivel az égőtől távolodva csökken az áramlás sebessége.

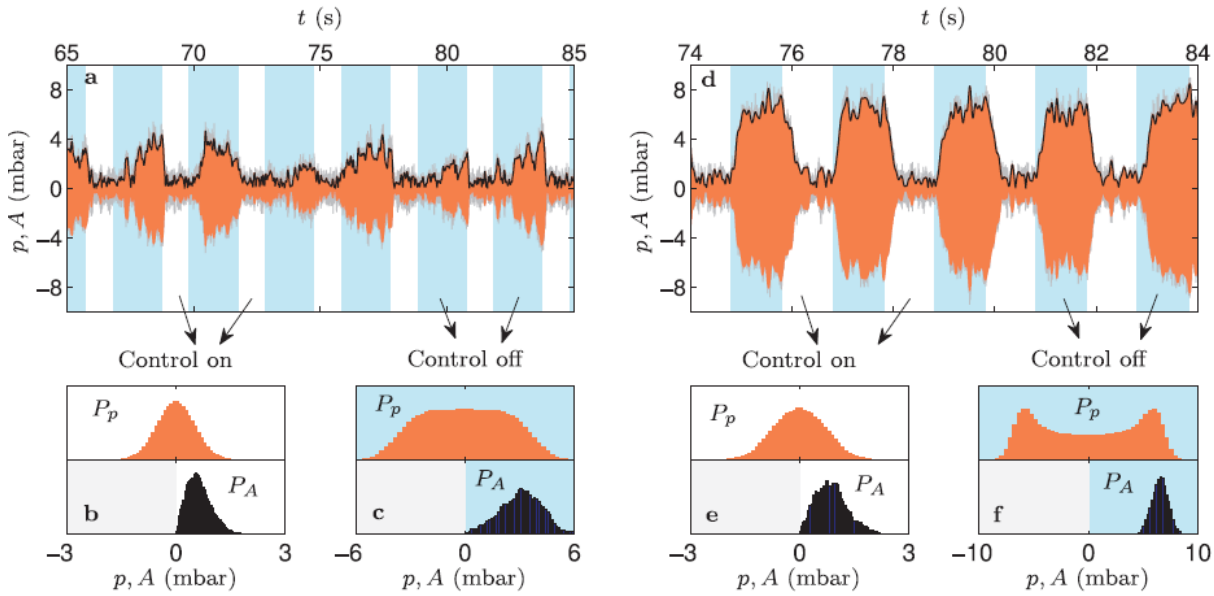
Egy másik cikkükben írják, hogy ők egy heterogén szenzor-rendszerben látják a jövőt, mikro- és nano szenzorokkal, melyek hőmérsékletet, nyomást és egyéb jellemzőket mérnek. Ezen elképzeléshez kapcsolják a saját vizsgálatukat, melyben mikrofon- és hőmérő rendszer segítségével vizsgálták a lángot és megállapították, hogy a nagyobb mértékű hőmérséklet-ingadozás a láng szélén jelentős, ahol a lángfront a környezeti levegővel találkozik, míg az égési zaj forrása főként véletlenszerű nyomásingadozásokból ered, melyek a nagy turbulens kinetikus energiával rendelkező régiókhoz kötődnek [15].

Noiray és Denisov [16] érdekes úton indult el a spektrum elemzésével. A turbulens égés egy igen gyors folyamat, folyamatosan változik a láng és a spektrális összetevők amplitúdói is enyhén ingadoznak. A mai méréstechnika lehetővé teszi, hogy igen nagy mintavételezési frekvenciával rögzítsük a nyomásingadozást, ezek után lehetőség van a nyomásjel statisztikai vizsgálatra, valószínűségsűrűség-függvények illesztésére. 300 °C-ra előmelegített metánt tüzeltek, 30 kW tüzelési teljesítmény és 0,5-ös perdületszám mellett. A *2.6. ábra* különböző üzemállapotokban mutatja a spektrum egy részét.



2.6. ábra. Égési zaj spektruma a csúcsoknál tapasztalható amplitúdók jellegre helyes valószínűségsűrűség-függvényeivel [16].

A vizsgálat során a nyomásjelre illesztett burkológörbével foglalkoztak, tehát nem a hangnyomásszintet, hanem magát a hangnyomást vizsgálták. A *2.7. ábra* mutatja a nyomásingadozás értékét, ami pozitív és negatív lehet a környezeti nyomáshoz képest. A szabályzást egy hangszóróval oldották meg, amelynek szabályzókörbe való kötését jelölik a „Control on" és „Control off" feliratok. Kiemelendő, hogy a *2.6. ábra* különböző eseteinél látható valószínűségsűrűség-jellegek nem azt mutatják, hogy maga a dB érték (például a kékkel jelölt esetnél) vesz fel adott üzemállapotban két jól elkülöníthető értéket, hanem az a két csúcs azt takarja, hogy nagy a különbség a „pozitív" és „negatív" csúcsnyomás között, vagyis hogy nagy a hangnyomásszint, amit a spektrumból is látunk. A *2.7. ábra* alsó diagramjainak elfelezett változatait megnézve látjuk, hogy a pozitív, környezetinél nagyobb nyomás esetén milyen az eloszlás. Ez már jellegre azt adja, amit a hangnyomásszint esetében láthatnánk. A kutatás során elkezdtem foglalkozni ezzel a témával és a dolgozatban részletesen kifejtem az eredményeimet a *3.5. alfejezetben*.



2.7. ábra. Nyomásjelek és a belőlük előállított valószínűségsűrűség-függvények [16].

2.4. Perdületszám és lángalak

A perdületszám egy dimenzió nélküli szám, mely a perdületes áramlást jellemzi és a következőképpen számolható [17]:

$$S = G_\varphi/(G_x \cdot R), \tag{2.3}$$

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 ($S > 0{,}6$) [17].

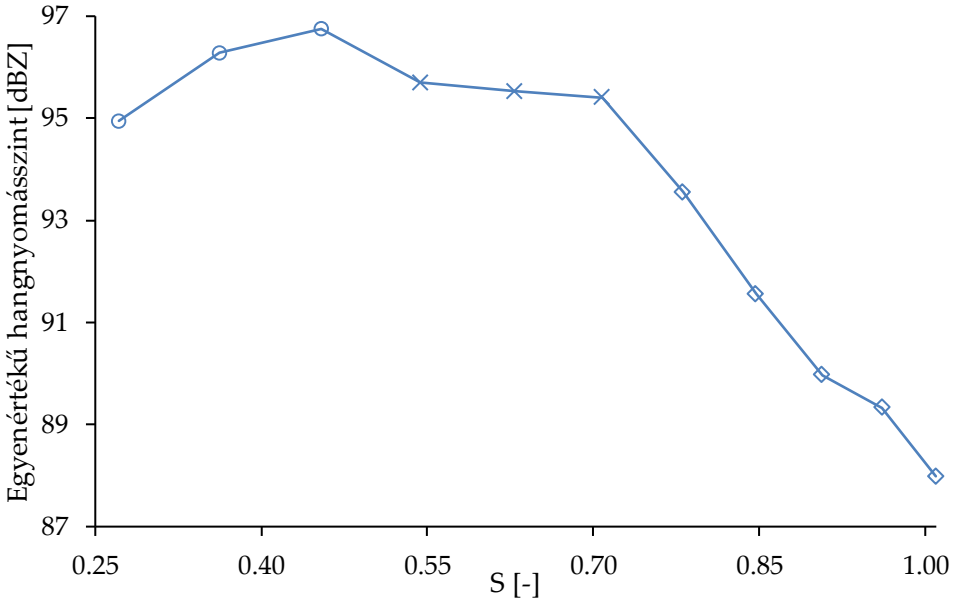
A mérés során három különböző lángstabilitási fázist különítünk el. A két stabil forma az egyenes, illetve a V alakú láng, előbbi gyengén perdületes, utóbbi pedig erősen perdületes áramlásokra jellemző. A V alakú láng esetében a precesszáló örvénymag leszakad és egy külső, valamint egy belső recirkulációs zóna is kialakul [17]. Amikor az égő szájára kilépőelemet, diffúzort helyezünk, akkor lényegében a külső recirkulációs zónát töltjük ki anyaggal, mely főként a falon megjelenő határréteg által elősegítheti a láng stabilitását.

Ezen a két lángalakon kívül megkülönböztetjük még az átmeneti állapotot is, amikor elkezd megjelenni a belső recirkulációs zóna, az egyenes és V alakú lángok felváltva vannak jelen [18]. Ez az üzemállapot kifejezetten negatív hatású a berendezés szempontjából, akár tönkre is teheti azt [6]. Az átmeneti állapot hasonlóan kezelendő, mint a rotordinamikában jelentkező kritikus fordulatszám, a zónán való minél gyorsabb áthaladás károsítja legkevésbé a berendezést [18]. A lángstabilitási fázisokról készült képeket a *2.8. ábra* mutatja.

2.8. ábra. Lángstabilitási fázisok. Balról jobbra: egyenes, átmeneti, V alakú.

2.5. Korábbi eredmények

A tavalyi TDK dolgozatomnak egyik főbb eleme volt a lángstabilitási fázisok közötti különbség vizsgálata az egyenértékű hangnyomásszint tekintetében, a releváns rész áttekintésében a *2.9. ábra* lesz segítségünkre. A függőleges tengelyen az egyenértékű hangnyomásszint látható, a vízszintesen a perdületszám értéke. Ahogy növeltük a perdületszámot megjelent az átmeneti lángalak, majd tovább növelve stabilizálódott a V alak. Az üres kör jelölők az egyenes, az X-ek az átmeneti, a gyémánt jelölők pedig a V alakú lángot jelölik. Jelen dolgozat során azt a jelenséget fogom vizsgálni, mely a V alakú szakaszát jellemzi a görbének. Nevezetesen, hogy a V alakú láng esetén lineáris a kapcsolat a perdületszám és az egyenértékű hangnyomásszint között.

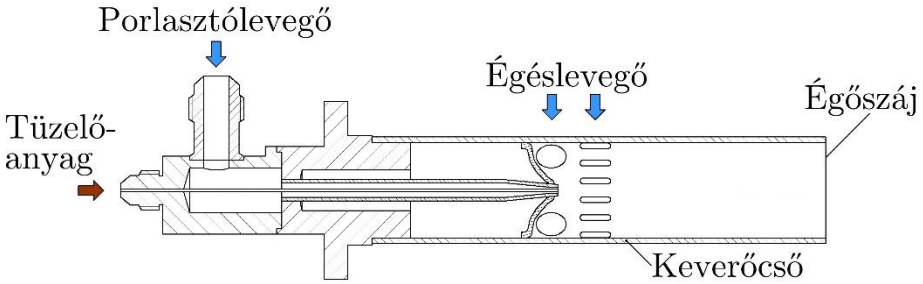


2.9. ábra. A lángalak hatása az egyenértékű hangnyomásszintre.

3. MÉRÉS ÉS AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

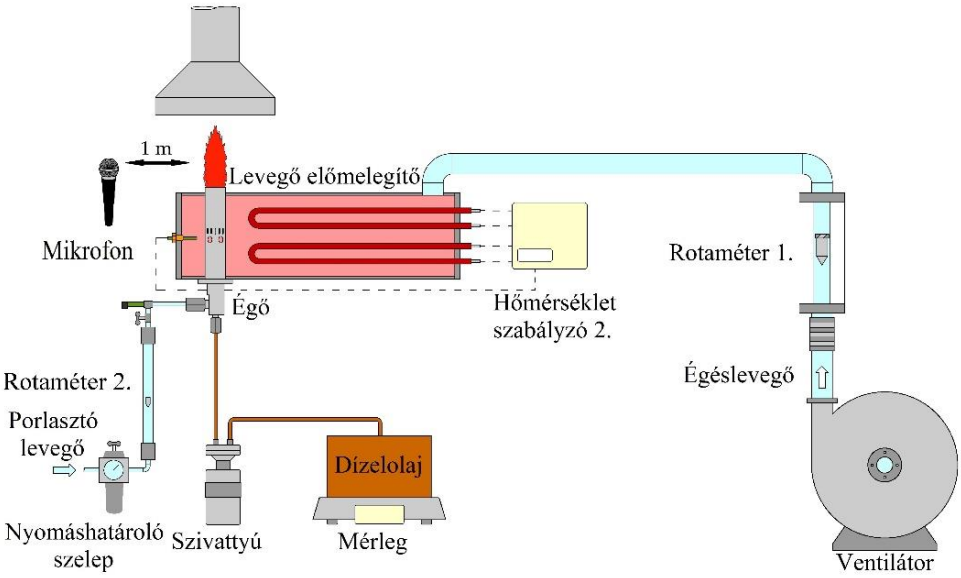
3.1. A mérőrendszer és a mérés menete

Az általam vizsgált mérési sorozat esetén egy szegény keverékkel üzemelő, előkeveréses, perdítőelemes, előpárologtató rendszerű (ún. LPP, Lean Premixed Prevaporized) égővel történt a tüzelés (*3.1. ábra*), az alkalmazott tüzelőanyag szabványos dízelolaj volt (EN 590:2014). A központi tüzelőanyag vezetékkel párhuzamosan, gyűrű keresztmetszetben lép be a nagysebességű porlasztólevegő, 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, ahol lehetőségük van a cseppeknek elpárologni, így már egy relatíve homogén tüzelőanyag-levegő keverék éri el a lángfrontot. [18]



3.1. ábra. Az alkalmazott 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 pedig egy digitális mérlegre helyezett edényből egy feszültségvezérelt lamellás szivattyú juttatta az égőbe. A porlasztólevegő térfogatáramát szintén egy rotaméter mérte, a kívánt porlasztónyomást pedig egy nyomáshatároló szelep biztosította és egy nyomástávadó mérte [18]. A láng zaját egy mikrofon vette fel, melyet a lángtól 1 m-re helyeztünk el, főbb adatait az *3.1. táblázat* tartalmazza, a *3.3. ábra* pedig egy kép a mikrofonról.



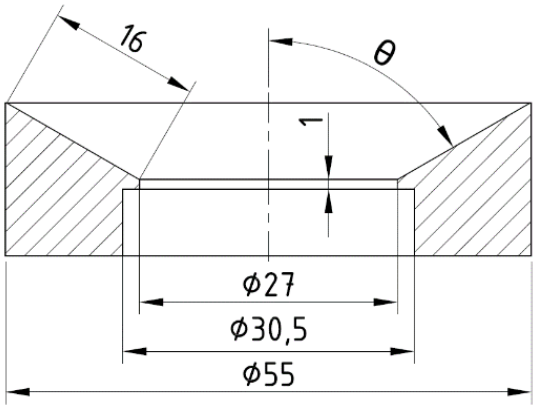
3.2. ábra. Az égővizsgáló tesztpad vázlata.

3.1. táblázat. Az alkalmazott mikrofon és mérőeszköz adatai.

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

3.3. ábra. A mérőmikrofon.

A mérés során az égő szájára különböző félkúpszögű diffúzorokat helyeztünk, melyek lángstabilizáló hatással bírhatnak. 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*), melyeket a 30 mm külső átmérőjű égőszájra illesztettünk a megvezetés segítségével [18]. A mérések során adott diffúzor és porlasztónyomás mellett fokozatosan növeltük az égéslevegő térfogatáramát 10 m^3/h-tól a láng lefúvásáig.



3.4. ábra. Az alkalmazott diffúzorok fő méretei.

3.5. ábra. Az alkalmazott diffúzorok. Balról jobbra: 60°, 45°, 30°, 15°, 0°.

3.2. Mintavételezés, adatfeldolgozás, hibaszámítás

A mérések során tehát adott diffúzor és porlasztónyomás mellett az égéslevegő térfogatáramát fokozatosan, diszkrét lépésekkel emeltük 10 m^3/h-tól a láng lefúvásáig. Összesen 6 különböző geometria mellett, mindegyik esetében 6 különböző porlasztónyomással zajlottak a mérések és valamennyi esetben (a lángstabilitási karakterisztikától függően) 6-11 különböző égéslevegő térfogatáramú mérési pontot sikerült felvenni. A kiértékelés során az így előállt 36 mérést vizsgáltam. Az égéslevegő térfogatáramát 2 m^3/h-val növeltük két mérési pont között, mely a rotaméteren egész osztás, kg/h-ban pedig 11,9 kg/h-tól indultunk és 2,4 kg/h-nak számít a 2 m^3/h-val való növelés.

A mikrofon által rögzített hangfájlok .SVL formátumúak, melyeket a SvanPC++ gyártói célszoftverrel lehet megnyitni. A programból kimenthetők az általa feldolgozott adatok Excelbe, valamint a hangfelvétel is nyers .wav fájlként, melyet utána Matlabbal lehet tovább vizsgálni.

Az adatok feldolgozása során először ki kellett jelölni a hangfájlokban a mérési pontokat. Minden méréshez tartozott egy mérési terv, ami alapján meg lehetett állapítani, hogy a hangfájl mely szakasza melyik mérési ponthoz tartozik. Mindegyik mérés különböző volt, mindegyik mérési pont különböző hosszúságú, ezért a kijelölést nem lehetett Excelre vagy Matlabra bízni, hanem kézzel kellett elvégezni. A vizsgálatnak ezen része a tavalyi TDK dolgozatomra való készülés során megtörtént, abban részletesen le van írva ennek a folyamata [19].

Ahogy valamennyi mérés, ez is hibával terhelt, melyek közül a legrelevánsabb és legjelentősebb hiba a perdületszám értékében lehet. A *2.4 alfejezet* (2.3) egyenletében leírtam, hogy a perdületszám miként áll elő, mely összefüggésből 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, melyek közül előbbi a G_φ, utóbbi a G_x értékét befolyásolja [19]. Ezeken kívül még érdemes számolni a porlasztónyomás mérésnek hibájával.

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 1,6 %. A porlasztólevegőt mérő rotaméternek 30 l/min, az égéslevegőt mérőnek pedig 30 m^3/h a méréshatára, tehát ennek az 1%-a illetve 0,4%-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 [19]:

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

$$\Delta V_{porl} = 0{,}004 \cdot 30 + 0{,}012 \cdot V_{porl}, \tag{3.2}$$

ahol $V_{él}$ és V_{porl} a rotaméterekről leolvasott értékek. A porlasztónyomás mérésének hibája 1 kPa volt minden esetben. Ezekből a perdületszám hibája:

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

A perdületszámon kívül jelen dolgozatban a légfelesleg-tényező is a vizsgált változók közé került, így annak is számítottam a hibáját. A légfelesleg-tényező a valós égéslevegő mennyiség ($m_{valós}$) és az égéshez elméletileg szükséges égéslevegő menynyiség ($m_{elméleti}$) hányadosa, vagyis:

$$\lambda = m_{valós}/m_{elméleti} \tag{3.4}$$

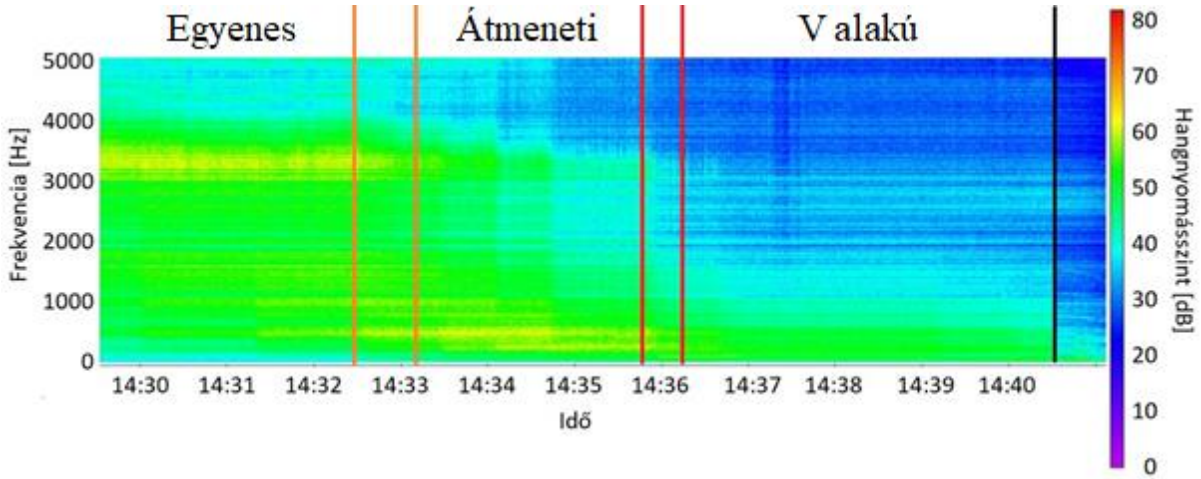
A hiba ebben az esetben is elsősorban a rotaméterekből ered, valamint szerepet játszik még a tüzelőanyag mennyiség mérésének hibája, mely az elméletileg szükséges égéslevegő mennyiség meghatározásához kell. Így a légfelesleg-tényező hibája a következő:

$$\Delta\lambda(V_{él}, V_{porl}, m_{tüz}) = \sqrt{(\partial\lambda/\partial V_{él} \cdot \Delta V_{él})^2 + \left(\partial\lambda/\partial V_{porl} \cdot \Delta V_{porl}\right)^2 + (\partial\lambda/\partial m_{tüz} \cdot \Delta m_{tüz})^2} \qquad (3.5)$$

A (3.3) és a (3.5) összefüggés eredményeit, így a hibát minden mérési pontra a *Függelék 7.1. alfejezete* tartalmazza. Ezeken kívül a valószínűségsűrűség-függvények esetén a Matlab megadja a 95%-os konfidencia intervallumot a különböző paraméterekre vonatkozóan.

3.3. Különböző lángalakok spektrumai

A *3.6. ábra* egy vízesés diagram, amely a Svan PC++ szoftverrel készült. A narancssárga vonalakkal jelölt időben jelent meg az átmeneti állapot, a pirossal jelölt során stabilizálódott a V alak (két mérési pont közötti átállások intervallumai a lángstabilitási fázisok határain), a fekete vonallal jelölt pillanatban pedig lefújódott a láng. Látható, hogy egyenes lángalaknál a 3-3,5 kHz körüli tartomány domináns, azonban az ennél kisebb frekvenciák is jelentősek, majd az átmeneti tartományban, ahol a két lángalak véletlenszerűen váltakozva fordul elő, fokozatosan az alacsonyabb frekvenciák felé tolódik el a spektrum. V alak esetén a korábban domináns összetevők szinte eltűnnek, csak a néhány száz Hz-esek jelentősebbek, valamint 2000 Hz-ig láthatunk a kialvás utáni állapottól jobban eltérő komponenseket. Ezen kívül említésre méltó, hogy 500 Hz közelében bizonyos frekvenciák felerősödnek az átmenetivé válás körül, melyek amplitúdója V alak esetén szintén lecsökken.



3.6. ábra. Vízesés diagram.

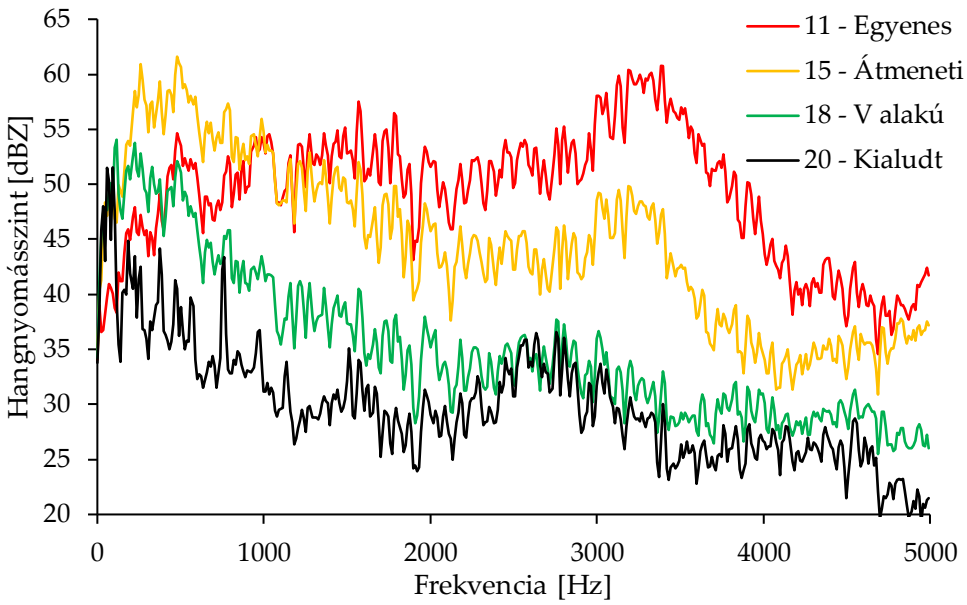
A fenti első következtetések részletesebb vizsgálatához használtam fel az Excelbe kimentett adatokat. Alapvetően kétféle megközelítést alkalmazva mutatom be az eredményeket. Egyrészt, vizsgáltam a különböző diffúzorok spektrumait, ugyanazon porlasztónyomás esetén úgy, hogy minden diffúzornál kigyűjtöttem a 0,8 bar porlasztó-

nyomású méréshez tartozó mérési pontok átlagos spektrumát és ezeket ábrázolva vonok le következtetéseket. Az átlagolás során nem megfelelő a számtani átlagot venni, mivel logaritmikus skálán mozgunk a hangnyomásszintek esetén, ezért a Studiotips honlapon talált, kifejezetten ezt a célt szolgáló Excel képletet alkalmaztam [20]. Másrészt a 15°-os félkúpszögű diffúzorra koncentrálva kigyűjtöttem valamennyi mérési ponthoz az adatokat és az azonos diffúzor esetén alkalmazott különböző porlasztónyomások hatását vizsgálom. A *3.2. táblázat* tartalmaz néhány főbb információt a következőkben ábrázolt adatsorokról, a továbbiakban a táblázatban alkalmazott sorszámmal hivatkozok az egyes mérési pontokra.

3.2. táblázat. A jelenlegi fejezetben tárgyalt mérési pontok kiemelt paraméterei.

	Θ [°]	p_{porl} [bar]	$\dot{m}_{lev}$ [kg/h]	S [-]	Alak
1	-	0,81	14,3	0,29	E
2	-	0,81	>23,9	-	-
3	0	0,82	14,3	0,29	E
4	15	0,30	11,9	0,47	E
5	15	0,30	33,5	1,19	V
6	15	0,45	11,9	0,35	E
7	15	0,45	33,5	1,07	V
8	15	0,61	11,9	0,27	E
9	15	0,61	33,5	0,97	V
10	15	0,83	11,9	0,21	E
11	15	0,83	14,3	0,29	E
12	15	0,83	16,7	0,37	E
13	15	0,83	19,1	0,45	E
14	15	0,83	21,5	0,53	Á
15	15	0,83	23,9	0,60	Á
16	15	0,83	26,3	0,67	Á
17	15	0,83	28,7	0,74	V
18	15	0,83	31,1	0,80	V
19	15	0,83	33,5	0,85	V
20	15	0,83	>33,5	-	-
21	15	1,12	11,9	0,16	E
22	15	1,12	33,5	0,75	V
23	15	1,55	11,9	0,13	E
24	15	1,55	33,5	0,63	V
25	30	0,83	14,3	0,29	E
26	30	0,83	28,7	0,74	V
27	45	0,81	14,3	0,29	E
28	45	0,81	28,7	0,74	V
29	60	0,81	14,3	0,29	E

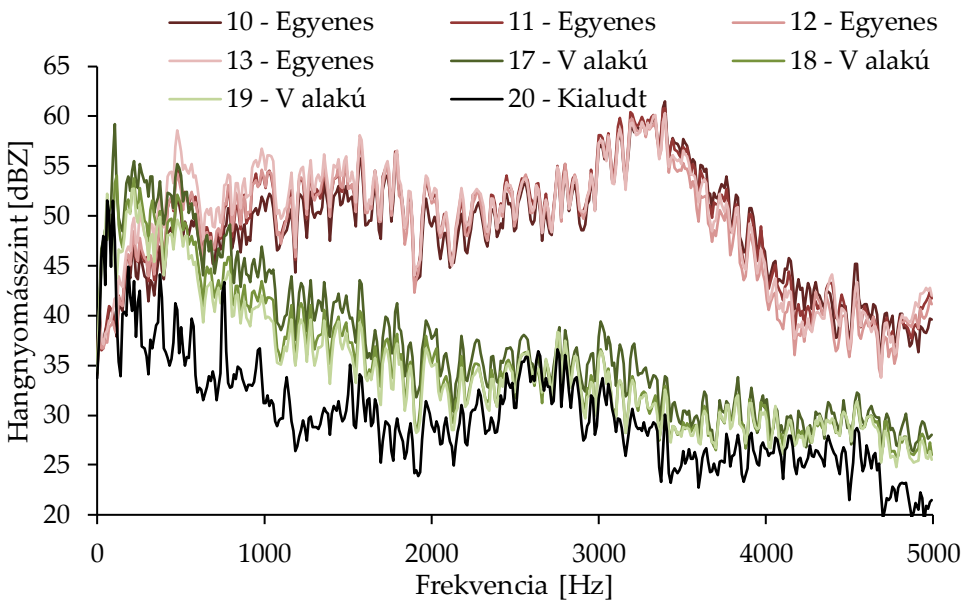
Először nézzük meg, hogy a spektrum kétdimenziós ábrázolása során milyen alapvető különbségek látszanak az egyes lángalakok között. Ezt a *3.7. ábra* szemlélteti, ahol a 15°-os diffúzor, 0,83 bar porlasztónyomású mérésének három adatsorát látjuk, valamint a láng lefúvása utáni zaj spektrumát, mint égés nélküli viszonyítási alapot. A *3.2. táblázat* 11, 15, 18 és 20 jelű mérési pontjai láthatóak az ábrán.



3.7. ábra. Különböző lángalakok spektrumai 15°-os félkúpszögű diffúzor és 0,83 bar porlasztónyomás mellett.

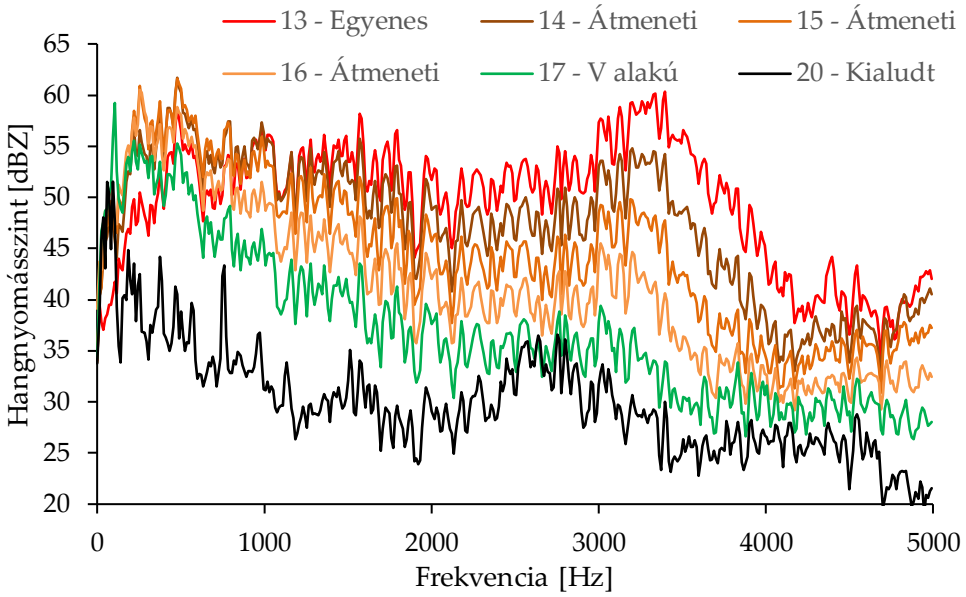
A különböző állapotok között igen jelentős eltérés van a spektrum karakterisztikájában. Egyenes lángnál igen széles tartományon tapasztalunk jelentős amplitúdójú összetevőket, a csúcsfrekvencia pedig 3400 Hz körül található, ezzel szemben a stabil V alakú láng esetén egyrészt jóval kisebb amplitúdójú komponensek vannak (a láng maga is lényegesen halkabb V alakú láng esetén [21]), másrészt 2-2,5 kHz fölött szinte nem is különbözik a kialvás utáni spektrumtól. A kettő közötti átmeneti szakaszon, ahogy ez a *3.6. ábra* alapján is látható volt, néhány kHz-es frekvenciák esetén egyenes és V alak közti érték tapasztalható, valamint megfigyelhető a felerősödő, néhány száz Hz-es tartomány. A néhány kHz-es összetevők értékére magyarázatot adhat az, hogy az átmeneti tartományban periodikusan ugrál egyenes és V alak között a láng, ezért a mérési pont során mind a két alak jelen volt. A kisebb frekvenciák felerősödése nem magyarázható meg ez alapján, annak az értékelése még további vizsgálatokat igényel.

Az egyenes és V alakú mérési pontok spektruma adott porlasztónyomás és diffúzor esetén az égéslevegő térfogatáramának változásával csak mérsékelten változik, ezt hivatott bemutatni a *3.8. ábra*, melyen a *3.2. táblázat* 10, 11, 12, 13, 17, 18, 19 és 20 jelű mérési pontjai vannak. Látható, hogy az egyenes láng esetén 2 kHz fölött stabil a spektrum, 1,5 kHz alatt tapasztalható egy kis amplitúdó növekedés. V alak esetén már jobban különbözik a spektrum a három lángalak esetén, azonban a korábbi kutatások is kimutatták, hogy a V alakú láng egyenértékű hangnyomásszintje fokozatosan csökken a perdületszám növekedésével [21]. Maga a spektrum jellege nem változik, csupán szinte egyenletesen tetten érhető a hangnyomásszint folyamatos csökkenése, mely az egyenes lángra nem ennyire jellemző.



3.8. ábra. Egyenes és V alakú lángok spektrumai, 15°-os diffúzor, 0,83 bar porlasztónyomás mellett, különböző égéslevegő térfogatáram esetén.

Az átmeneti szakasz spektrális elemzése is jól mutatja azt a folyamatot, ahogy az egyenes láng V alakúvá válik az égéslevegő mennyiségének – így a perdületszám – növelésével, először csak néha alakot váltva, majd egyre nagyobb frekvenciával ugrálva a két lángalak között. A *3.9. ábra* görbéit megnézve ezt kiemelve is megfigyelhetjük. Ez az ábra is a 15°-os diffúzor, 0,83 bar porlasztónyomású esetének mérési pontjaiból készült, melyek a *3.2. táblázat* 13-17, illetve 20 jelű mérési pontjai, tehát látható rajta az utolsó tisztán egyenes, az első stabil V alakú, az égés nélküli, valamint a három átmeneti spektrum. A néhány kHz-es összetevők fokozatos elhalkulása jól kivehető a három egymást követő átmeneti mérési pont alapján, valamint látható az is, hogy 500 Hz körül felerősödnek a komponensek, majd V alakhoz érve csökken kissé az amplitúdójuk.

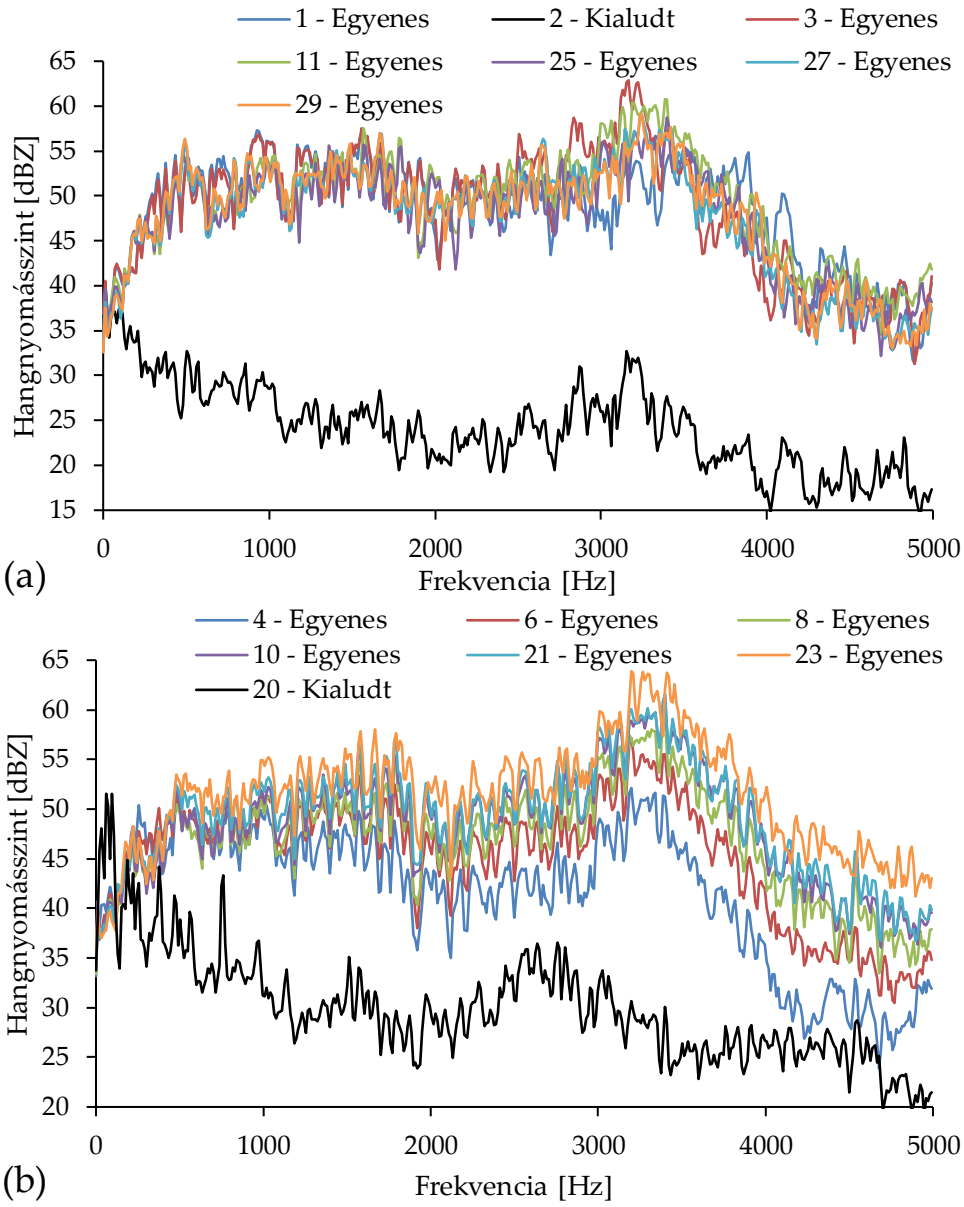


3.9. ábra. Átmeneti lángok spektrumai egyeneshez és V alakúhoz viszonyítva, 15°-os diffúzor és 0,83 bar porlasztónyomás esetén.

A következőkben elemezzük a különböző paraméterek hatását az egyenes és V alakú lángra. A *3.10. ábra* két féle összehasonlításban mutatja az egyenes lángok spektrumát. A *3.10. a ábra* esetében a *3.2. táblázat* 1, 2, 3, 11, 25, 27, 29 jelű mérési pontjai láthatók, vagyis olyan állapotok, melyeknél a porlasztónyomás és az égéslevegő térfogatárama azonos, a diffúzorok pedig különbözőek. A *3.10. b ábra* pedig a *3.2. táblázat* 4, 6, 8, 10, 20, 21, 23 adatait tartalmazza, melyek a 15°-os diffúzor mérései közül az azonos égéslevegő térfogatáramú, különböző porlasztónyomású pontokat tartalmazzák.

A *3.10. a ábra* esetén láthatóan jóval kevésbé térnek el a spektrumok egymástól, mely azt árulja el nekünk, hogy a különböző diffúzorok magát a spektrumot nem változtatják meg. Igazából nincs akkora eltérés a geometriai kialakításban, hogy ez lényeges hatással legyen a kialakuló zajra. Megjegyzendő, hogy a porlasztónyomás és égéslevegő térfogatáram azonosságával együtt, a perdületszám is közel azonos, tehát az áramlási viszonyokon csak a diffúzorok változtatnak.

A *3.10. b ábra* adatsorait megnézve jóval nagyobb szórással találhatók értékek bizonyos frekvenciáknál, ennek legfőbb oka a porlasztónyomások eltérésére vezethető vissza. A korábbi TDK-dolgozatban [19] megállapítottam, hogy a porlasztónyomás növelésével növekszik az egyenértékű hangnyomásszint, vagyis hangosabb lesz a láng. Láthatóan maga a spektrum karakterisztikája nem változik meg lényegesen a porlasztónyomás változásával, ellenben valahol meg kell jelennie benne az egyenértékű hangnyomásszint változásának. Ha megfigyeljük, a különböző porlasztónyomású spektrumok közötti különbség 1 kHz alatt mérsékelt, 1000-1500 Hz között kicsit nagyobb, és majd csak e fölött kezd jelentőssé válni. Korábban láttuk, hogy ez a tartomány az, ami kifejezetten az egyenes lángalakkal hozható összefüggésbe, hiszen V alaknál nem különbözik számottevően az áramlási zajtól. A növekvő porlasztónyomás hatására megváltozik az áramlás és égés turbulens viselkedése.

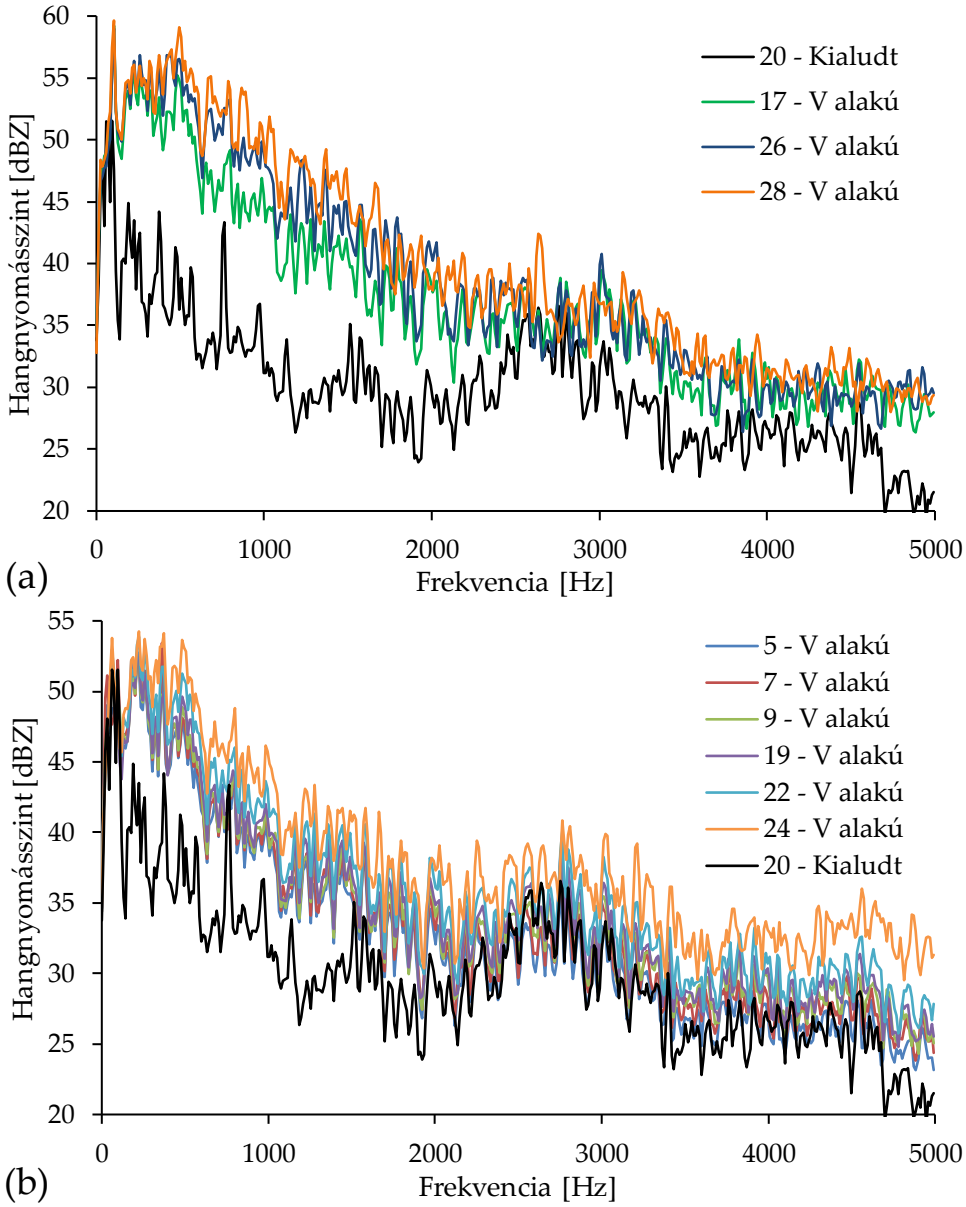


3.10. ábra. Egyenes lángalakok spektrumai. a, Különböző diffúzorok hatásai azonos porlasztónyomás és égéslevegő térfogatáram esetén ; b, Különböző porlasztónyomások hatása azonos diffúzor és égéslevegő térfogatáram esetén.

Felmerülhet a kérdés, hogy a fenti jelenségben milyen szerepe van annak, hogy az azonos égéslevegő térfogatáramú, eltérő porlasztónyomású mérési pontok esetén különböző a perdületszám értéke. Ehhez a *3.8. ábra* ad segítséget, ahol a porlasztónyomás állandósága mellett változó égéslevegő térfogatáram és így változó perdületszám a jellemző. A spektrumok eltérése elenyésző a *3.10. b ábra* esetén láthatóhoz képest, így megállapítható, hogy a porlasztónyomás változtatása jelentősebb hatással van a spektrumra, mint a perdületszám módosítása.

Hasonló megfontolások mentén készült a *3.11. ábra*. A *3.11. a ábra* a *3.2. táblázat* 20, 17, 26, 28 jelű adatsorait tartalmazza, a *3.11. b ábra* pedig a 5, 7, 9, 19, 20, 22, 24 jelűeket, előbbi tehát a diffúzorok közti különbséget szemlélteti, utóbbi pedig az azonos égéslevegő térfogatáramú és diffúzorú eseteket. Lényegében nem látunk jelentős eltérést a spektrumokban, a karakterisztika teljesen hasonló, mely összefüggésbe hozható azzal,

hogy a *3.10. ábra* esetén a kisebb frekvenciákon szintén mérsékelt eltérést tapasztaltunk, csak nagyobbaknál volt valamivel láthatóbb az eltérés. Említésre méltó eltérést a *3.8. ábra* görbéin láthatunk, ahol az égéslevegő térfogatáram, ezzel együtt a perdületszám növekedésével csökken a hangnyomásszintje a spektrum összetevőinek. A korábbi kutatásra utalhat vissza ez is, nevezetesen, hogy a perdületszám növelésével egyre halkul a láng [21], aminek a spektrális összetevőkben is meg kell jelennie. Tény azonban, hogy ez a folyamat az egyenértékű hangnyomásszint esetén látványosabb, a spektrális összetevők ezen folyamattal való összefüggése ennél részletesebb vizsgálatot igényel, tekintve, hogy a *3.11. a ábrán* is látunk olyan mértékű különbséget, mint a *3.8. ábra* esetén, holott csak a diffúzor tér el a három adatsornál.

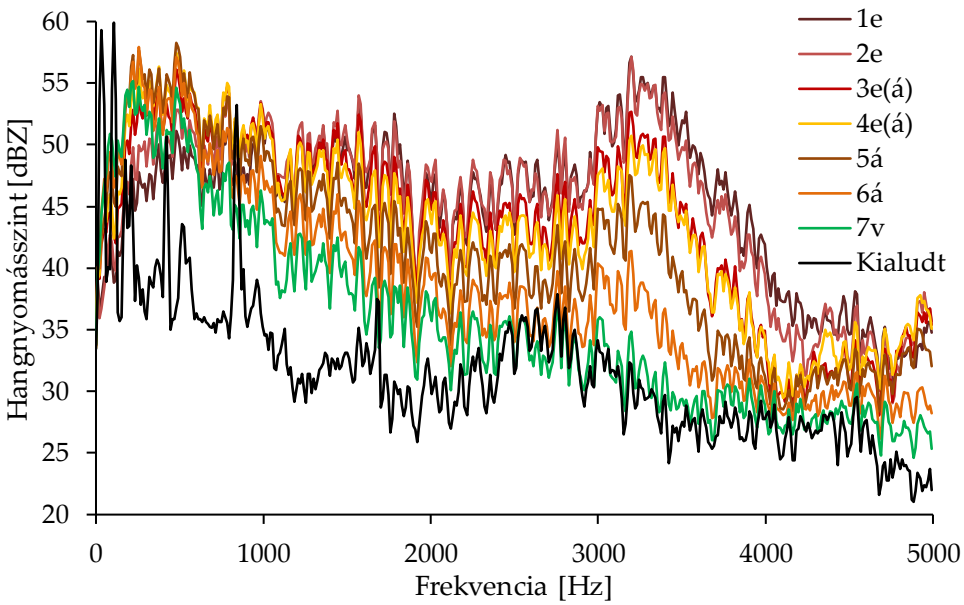


3.11. ábra. V alakú lángok spektrumai. a, Azonos porlasztónyomás és égéslevegő térfogatáram, különböző diffúzorok ; b, Azonos diffúzor és égéslevegő térfogatáram, különböző porlasztónyomás.

Végül a *3.12. ábra* segítségével vizsgáljunk meg egy érdekes jelenséget, melyet a 15°-os diffúzor alkalmazásával, 0,45 bar porlasztónyomáson zajlott méréssel mutatok be, melyhez a *3.3. táblázat* mutatja az egyes mérési pontok néhány adatát. A lángalak behatárolása a mérés során tapasztaltaktól függött. Az átmeneti lángnál az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter ugrálni kezd és a láng hol szétnyílik, hol összezárul, a szemrevételezéssel megállapított lángalak meghatározás során ez jelezte az átmeneti állapotot. Azonban az előzőekben leírt ismeretekkel nem mindenhol vág össze a szemrevételezéssel megállapított lángalak és a spektrum alapján megállapítható. A szürkével jelölt mérési pontokat nem tartalmazza a *3.12. ábra*, mert az értékelés szempontjából nem relevánsak és csökkentik az áttekinthetőséget.

3.3. táblázat. A 15°-os diffúzorú, 0,45 bar porlasztónyomású mérés néhány adata

Jelölés	$\dot{m}_{lev}$ [kg/h]	S [-]	Lángalak szemrevételezéssel	Lángalak spektrum alapján
1e	11,9	0,35	E	E
2e	14,3	046	E	E
3e(á)	16,7	0,57	E	Á
4e(á)	19,1	0,66	E	Á
5á	21,5	0,75	Á	Á
6á	13,9	0,83	Á	Á
7v	26,3	0,91	V	V
8v	28,7	0,97	V	V
9v	31,1	1,02	V	V
10v	33,5	1,07	V	V
11v	35,9	1,12	V	V
Kialudt	>35,9	-	-	-

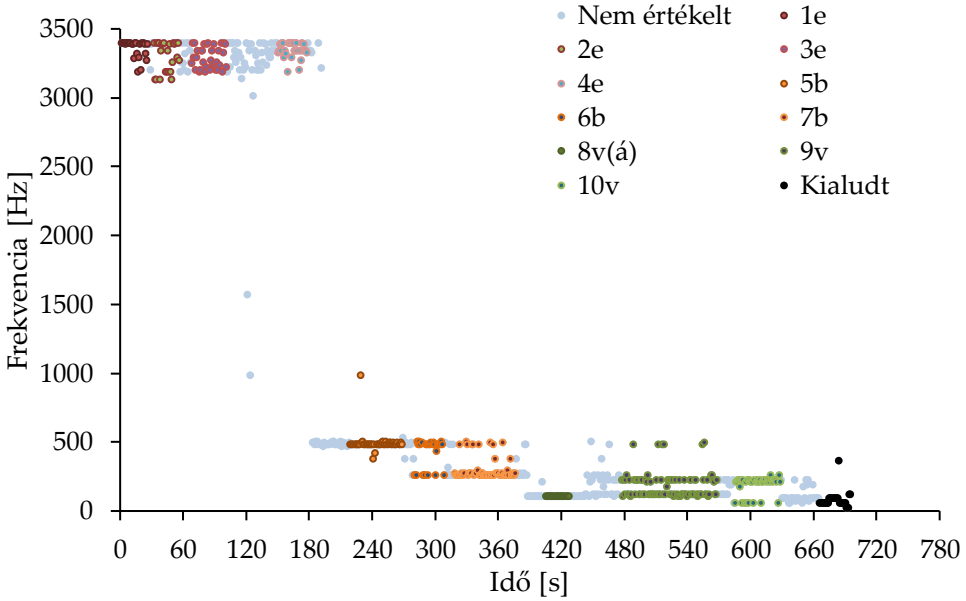


3.12. ábra. A 3.3. táblázathoz tartozó mérés spektrumai.

Bizonyos esetekben a lángstabilitási fázisok határán rendhagyó értékeket tapasztalhatunk. Néhol az utolsó egyenes már kissé átmeneti jelleget mutat (ebből van több), van, ahol az első átmeneti még inkább egyenes, az utolsó átmeneti már inkább V, esetleg az első V még inkább átmeneti. A *3.12. ábra* görbéit megnézve azt látjuk, hogy a harmadik és negyedik mérési pont ugyan még egyenesnek lett jelölve, de a 3-3,5 kHz körüli összetevőik már elkezdtek csökkenni jelentősebben, ezzel együtt az alacsony frekvenciás összetevők erősödtek. Ez egy tipikus átmeneti viselkedés, de a vizuális értékelés még egyenesnek vélte a lángot. Mivel a szemrevételezéshez képest a mikrofon mintavételezési frekvenciája jóval nagyobb, ezért megtörténhet, hogy már a szemmel látható periodikus lángalak-váltakozás előtt meg-megjelent a V alak. A spektrális karakterisztika jellegzetességeit ismerve pontosabban megállapítható a lángalak a mérések kiértékelése során, mint a szemrevételezésre hagyatkozva.

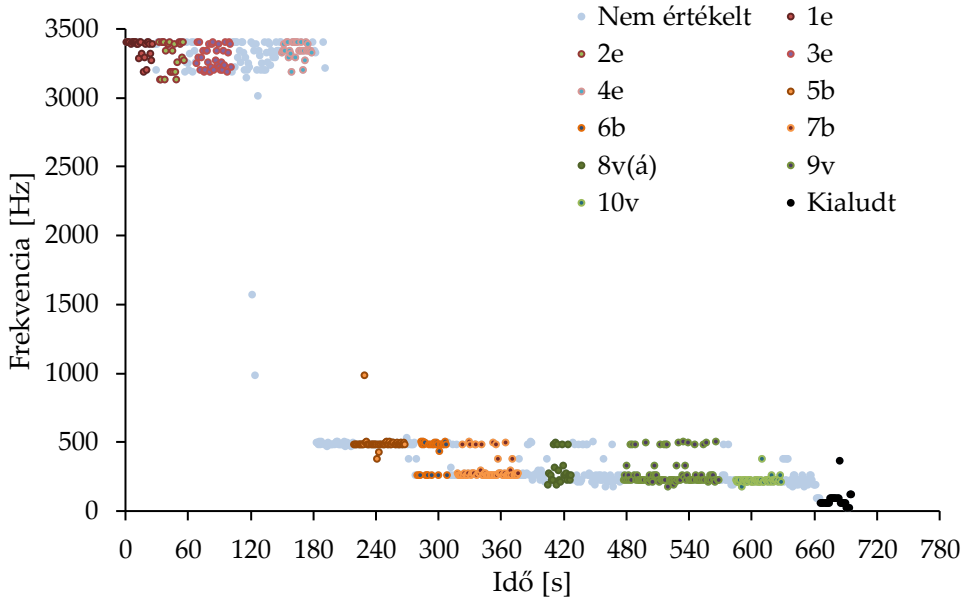
3.4. Frekvenciacsúcsok vizsgálata

A következőkben a spektrális elemzés folytatásaként a 15°-os diffúzor különböző porlasztónyomású mérései esetén fogom a spektrum csúcsait vizsgálni. Először minden másodperc minden frekvenciájához tartozó értéket normáltam, így a csúcsfrekvencia értéke 1 lett, minden más pedig egy 0-1 közötti szám. Ezek után Excel függvények segítségével kiválogattam minden másodperc esetén az 1-es értékhez tartozó frekvenciát, majd ezt ábrázoltam. A *3.13. ábra* egy ilyen diagramot mutat a 0,83 bar porlasztónyomású esethez. A különböző mérési pontok eltérő színnel vannak feltüntetve, jelölésként a *3.3. táblázat* és *3.12. ábra* kapcsán tárgyaltaknak megfelelően jártam el. Természetesen két jelölt mérési pont között is zajlott az égés, csak azok az értékek nincsenek benne a kiértékelésben, mert azokban a tartományokban történt az egyik mérési pontról másikra való átállás, ezeket halványkék színnel ábrázolom.



3.13. ábra. A spektrum csúcsfrekvenciái 15°-os diffúzor és 0,83 bar porlasztónyomás mellett.

Látható, hogy a mérés végéhez közeledve, ahogy egyre kisebb frekvenciák felé tolódik el a spektrum, bizonyos alacsony frekvenciák, melyek az utolsó másodpercekben, a már kialudt lángnál is jelen vannak, erősebbek a többinél. Ezek a frekvenciák valamennyi esetben azonosak és mivel a kialvás rendszerint nagy légáram mellett történt, ezért a ventilátor zajához köthetőek. A reálisabb eredmények érdekében ezen értékeket az égő keverék esetén kivettem a táblázatból, lényegében egy felül áteresztő szűrőt alkalmazva 117 Hz-nél, az eredményt a *3.14. ábra* mutatja. Látható, hogy a korábbi 117 Hz alatti csúcsok helyébe 250 és 500 Hz körüli csúcsok léptek, melyek a *3.6. ábra* alapján is a valós, égéshez tartozó csúcsok.



3.14. ábra. A 3.13. ábra szűrővel ellátott változata.

A *3.15. ábra* tartalmazza mind a 6 porlasztónyomás esetén a csúcsokat kiemelő diagramot, valamint a *3.4. táblázat* összefoglalja a vonatkozó körülményeket. A Jelölés oszlop a korábbiaknak megfelelően mutatja, hogy milyen alakúnak látszott, illetve zárójelben, hogy a spektrum inkább mire utal, valamint fel van tüntetve még a porlasztónyomás és a perdületszám az adott mérési pont esetén.

Alapvetően három csoportba sorolhatjuk a megjelenő csúcsokat. Nyilván egy nagyon gyors és intenzív folyamat az égés, ezért azt nem várhatjuk el, hogy a csúcsok jól lokalizáltak legyenek. A most ábrázoltak környezetében is hasonló amplitúdójú összetevők vannak, ezért láthatjuk, hogy a csúcs bizonyos mértékben ingadozik, mindennek ellenére egész jól körülhatárolható tartományok azonosíthatóak. Az egyik a 3400 Hz körüli tartomány, ahol 3200-3400 Hz között ugrál a csúcs az első mérési pontok körül, de úgy tűnik, mint ha a 3400 lenne a tartósabb. A másik az 500 Hz körüli, ami igazából a 480, 492 és 504 Hz-et takarja, túlsúlyban pedig a 480 Hz van. A harmadik a 220 Hz körüli tartomány, mely esetén leginkább a 222 és 270 Hz dominál.

3.4. táblázat. A 3.15. ábra diagramjaihoz tartozó adatok.

Jelölés	p_{porl} [bar]	S [-]
1e	0,29	0,47
2e	0,29	0,60
3e(á)	0,29	0,72
4é	0,29	0,82
5v(á)	0,29	0,91
6v	0,29	0,98
7v	0,29	1,05
8v	0,29	1,11
9v	0,29	1,15
10v	0,29	1,19
11v	0,29	1,23
Kialudt	0,29	-

Jelölés	p_{porl} [bar]	S [-]
1e	0,45	0,35
2e	0,45	0,46
3e(á)	0,45	0,57
4e(á)	0,45	0,66
5á	0,45	0,75
6á	0,45	0,83
7v	0,45	0,91
8v	0,45	0,97
9v	0,45	1,02
10v	0,45	1,07
11v	0,45	1,12
-	0,45	-

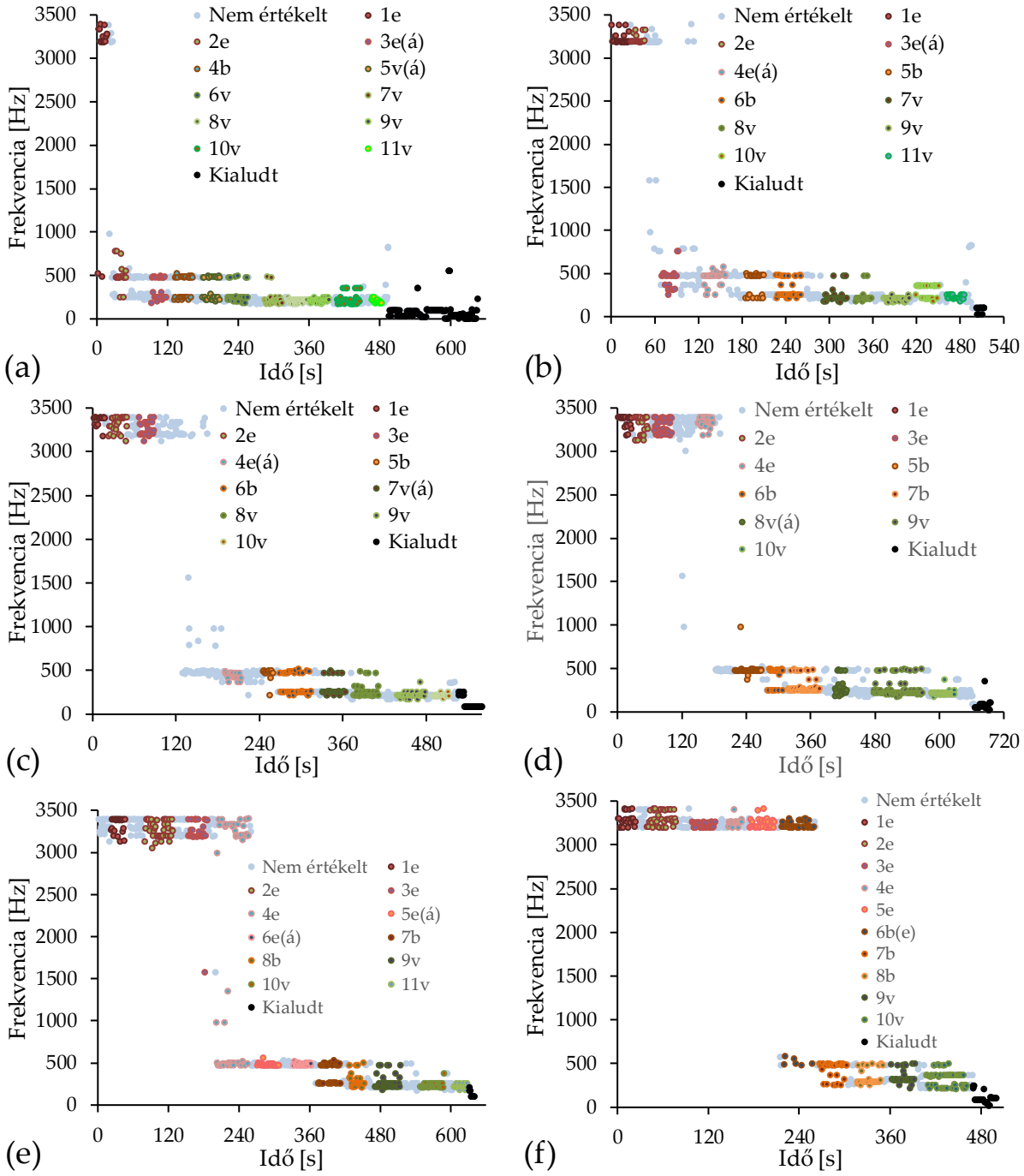
Jelölés	p_{porl} [bar]	S [-]
1e	0,61	0,27
2e	0,61	0,36
3e	0,61	0,45
4e(á)	0,61	0,55
5á	0,61	0,64
6á	0,61	0,72
7v(á)	0,61	0,79
8v	0,61	0,85
9v	0,61	0,91
10v	0,61	0,97
Kialudt	0,61	-

Jelölés	p_{porl} [bar]	S [-]
1e	0,83	0,21
2e	0,83	0,29
3e	0,83	0,37
4e	0,83	0,45
5á	0,83	0,53
6á	0,83	0,60
7á	0,83	0,67
8v(á)	0,83	0,74
9v	0,83	0,80
10v	0,83	0,85
Kialudt	0,83	-

Jelölés	p_{porl} [bar]	S [-]
1e	1,12	0,16
2e	1,12	0,23
3e	1,12	0,29
4e	1,12	0,36
5e(á)	1,12	0,43
6e(á)	1,12	0,50
7á	1,12	0,57
8á	1,12	0,63
9v	1,12	0,69
10v	1,12	0,75
11v	1,12	0,80
Kialudt	1,12	-

Jelölés	p_{porl} [bar]	S [-]
1e	1,55	0,13
2e	1,55	0,18
3e	1,55	0,23
4e	1,55	0,29
5e	1,55	0,35
6á(e)	1,55	0,41
7v	1,55	0,46
8v	1,55	0,52
9v	1,55	0,58
10v	1,55	0,63
Kialudt	1,55	-

Az első mérési pontoknál, ahogy ezt a *3.15. ábra* is mutatta, valamennyi esetben a 3400 Hz körüli összetevők közül kerül ki a csúcsfrekvencia. A stabil V alakú szakasz esetében 222 Hz körül van a csúcsfrekvencia, a kettő között pedig felerősödnek a 480 Hz körüli zajok. A 480 Hz-es csúcs már a legtöbb esetben az egyenes szakasz végén (van olyan eset, ahol a spektrum alapján nem lenne okunk átmenetinek mondani az égést és mégis a 480 Hz dominál) megjelenik. Átmeneti esetben váltakozva kerül ki a csúcsfrekvencia az 500 Hz és 220 Hz körüli összetevők közül, majd az 500 Hz körüliek ismét eltűnnek.



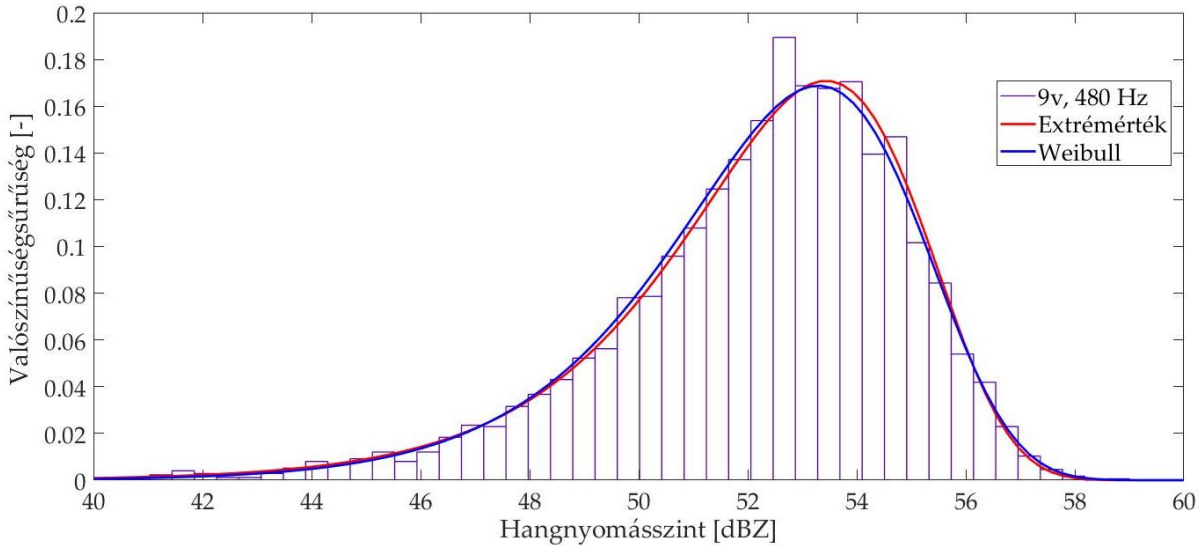
3.15. ábra. A spektrális csúcsok 15°-os diffúzor alkalmazása mellett különböző porlasztóyomásokon. a, 0,29 bar ; b, 0,45 bar ; c, 0,61 bar ; d, 0,83 bar ; e, 1,12 bar ; f, 1,54 bar.

Ez a fajta ábrázolás korlátol a további következtetések levonásában, azonban arra jó, hogy kiemeljen első közelítésben bizonyos jellegeket, melyek további vizsgálódásra adnak okot.

3.5. Csúcsok vizsgálata valószínűségsűrűség-függvénnyel

A csúcsok vizsgálata során, ahogy az az *Irodalmi áttekintés* fejezetben említett Noiray és Denisov [16] cikk kapcsán felmerült, megvizsgáltam a különböző lángstabilitási fázisokhoz köthető csúcsok amplitúdójának valószínűségsűrűségét. A kimentett wav fájlokat Matlab segítségével feldolgozva lehetőség nyílik a statisztikai vizsgálatra, valószínűség-sűrűségfüggvények illesztésére.

Először a Matlab Distribution Fitter applikációját használva nézzük, hogy hogyan is néz ki egy mérési pont valószínűségsűrűsége. A vizsgálat során mérési pontonként haladtam itt is, vagyis adott diffúzor, adott porlasztónyomás, adott égéslevegő térfogatáramú mérési pont képezte az egységet. Előzetesen elmondható, hogy az egyenes és V alakú esetekben is nagyon hasonlóan néz ki az eloszlás, ugyanazzal a függvénnyel érdemes leírni. A *3.16. ábra* a 15°-os diffúzor, 0,83 bar porlasztónyomású esetének egyik V alakú mérési pontjához készült a 480 Hz-es frekvenciához tartozó adatok vizsgálatával.



3.16. ábra. Egy mérési pont valószínűségsűrűsége és a ráillesztett Weibull-, valamint extrémérték eloszlásfüggvények.

A vízszintes tengelyen a vizsgált frekvencia dB értékei láthatóak, a függőleges tengelyen pedig a valószínűségsűrűség. Egy valószínűségi változó sűrűségfüggvénye olyan függvény, mely normálva van, így a görbe alatti terület értéke 1, mely azért szükséges, hogy a különböző mérési pontok összehasonlíthatóvá váljanak, függetlenül attól, hogy milyen hosszúak, hány adatból készül az eloszlás. Érdemes megjegyezni, hogy ez az eloszlás hasonlít a *2.7. ábra* „Control off" jelölésű valószínűségsűrűség eloszlásaira.

Az összes ráilleszthető valószínűségsűrűség-függvény kipróbálásával igazából kettő olyan volt, ami számításba jöhetett. Az egyik a Weibull eloszlás, mely kékkel látható, a másik az extrémérték eloszlás, mely pirossal. A két eloszlás között van kapcsolat, a Weibull eloszlás az általános extrémérték eloszlás speciális esete. A modellezéshez a választás a Weibull eloszlásra esett, mivel összességében ez mutatott jobb illeszkedést, így a továbbiakban ezt alkalmazom.

A Weibull eloszlás egy két paraméteres folytonos valószínűség-eloszlás. A Weibull x valószínűségi változó valószínűség-sűrűségfüggvénye:

$$f(x;\lambda,k) = \begin{cases} k/\lambda_W \cdot (k/\lambda_W)^{k-1} \cdot \exp(-(k/\lambda_W)^k), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0, \end{cases} \tag{3.6}$$

ahol $k > 0$ az alakparaméter és $\lambda_W > 0$ a skálaparaméter [22].

A valószínűségsűrűség-függvények (Probability Density Function – PDF) készítése úgy történt, hogy először elkészítettem Matlab segítségével a hangfájl vízesés diagramját, így egy bizonyos idő és frekvencia felbontással kaptam amplitúdó értékeket, akárcsak a *3.6. ábra* esetén, ezek után illesztettem rá egy Weibull eloszlást, majd ennek számos paraméterét lekérdeztem és kiírtam őket Excelbe, hogy ott további vizsgálatokat tudjak végezni rajtuk.

Az első dolog, amit el kellett dönteni, hogy milyen ablak és átfedés alkalmazása mellett készítsem a Fourier transzformálást. Ha az ablak mérete kisebb, akkor kisebb időszeleteket vizsgál egyszerre, vagyis az időfelbontás egyre jobb lesz, azonban ez csak a frekvencia felbontás rovására történhet. Ha növelem az ablakot, akkor egyre pontosabban tudom a frekvenciákat, de kevésbé tudom, hogy időben pontosan mikor jelentek meg. Az átfedés változtatásával az ablak nem a teljes ablak szélességével „lép tovább", hanem bizonyos időt még egyszer kiértékel, ez által javítható az időbeli felbontás.

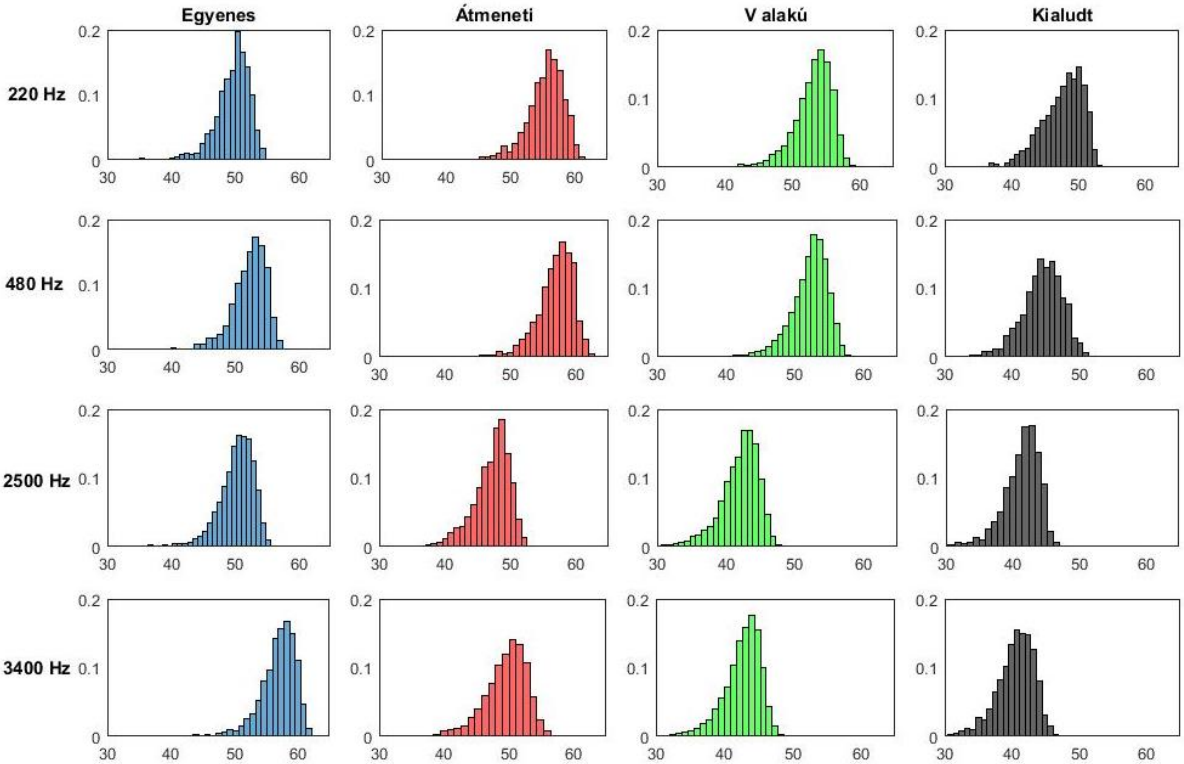
Az ablak méretét kettő hatványaiként szokták megadni (256, 512, 1024, 2048, …), ahol a szám értéke és a mintavételezési frekvencia alapján meghatározható a kapott frekvencia felbontás. Esetünkben 12 kHz volt a mintavételezési frekvencia, vagyis az 1024-es ablakkal, amit a SvanPC++ -os vizsgálatnál alkalmaztunk 11,72 Hz-es felbontást kapunk. A 256 és az 512 még elég durva frekvencia felbontást eredményez (46,88 Hz és 23,43 Hz), annál pontosabban kellene tudni az összetevőket, a 2048-as ablak esetében viszont nagyon kevés adatunk lesz időfelbontás tekintetében, és mivel több esetben is csak fél perces mintákkal tudtam dolgozni, ez nem megfelelő. Tehát az 1024-es ablak egy megfelelő választás a jelen korlátok között. Megjegyzendő, hogy ennek a problémának a kiküszöbölésére van megoldás, például a Wavelet transzformáció alkalmazása, azonban az ez irányú kutatás még folyamatban van, a dolgozatba beilleszthető eredmény még nem áll rendelkezésre.

Az átfedés növelése növeli a rendelkezésre álló adatok mennyiségét. A *Függelék 7.2. alfejezete* tartalmaz néhány gondolatot arról, hogy az eloszlás paramétereinek meghatározása szempontjából miért nem túl számottevő az átfedés mértéke. Az általam választott átfedés 75%.

Első közelítésben 4 frekvenciát választottam ki a vizsgálathoz, ezek a 3400 Hz, 2500 Hz, 480 Hz és 222 Hz. A 2500 Hz azért került kiválasztásra, mivel annak a közelében nem volt csúcs, lényegében egyenes esetén nem változott sokat ez az összetevő, majd az átmeneti szakaszban szépen elhalkult. Kontrollként megvizsgáltam, hogy egy a csúcsoktól messzebb lévő összetevő miként viselkedik.

Először nézzük meg, hogy milyen eloszlást mutat ez a négy frekvencia, a 15°-os diffúzor, 0,83 bar porlasztónyomású esetének négy mérési pontját megnézve, melyeket a *3.17. ábra* mutat. Minden komponens esetén az első mérési pontot (egyenes), egy átmenetit, egy V alakút és a kialvás utáni állapotét ábrázoltam. A függőleges tengelyeken a valószínűségsűrűség van [-], a vízszintesen a hangnyomásszint [dBZ], de az ábra áttekinthetősége miatt egyszerűsítettem a megjelenésén.

Az eloszlásokat megnézve láthatjuk az eddig levont következtetések megerősítéseit. Az egyenes szakaszon a 3400 Hz-es összetevő dominál a vizsgáltak közül. Az átmeneti szakaszon a 222 Hz és 480 Hz frekvenciájú komponensek jócskán megerősödnek, a 2500 Hz elkezd csökkenni, a 3400 Hz szintén csökken. A V alaknál a 480 Hz láthatóan alacsonyabb amplitúdóval van jelen, mint átmenetinél, a 2500 Hz és 3400 Hz pedig szinte nem is különbözik attól, ami a kialvás után tapasztalható, vagyis első ránézésre statisztikailag is úgy tűnik, hogy ott már nincs jelen égésből eredő zaj.



3.17. ábra. Valószínűségsűrűség eloszlások 15°-os diffúzor és 0,83 bar porlasztónyomás esetén.

Két érdekességet lehet kiemelni az ábrázolt valószínűség-sűrűségfüggvények alakját tekintve. Az egyik az átmeneti szakasz jellege, kiváltképp a 3400 Hz-es összetevőnél. Ott a leglátványosabb a különbség az egyenes és a V alakú láng hangnyomásszintjében, és mivel mind a kettő megjelenik felváltva az égés során, ezért egy laposabb, elnyújtottabb eloszlást kapunk.

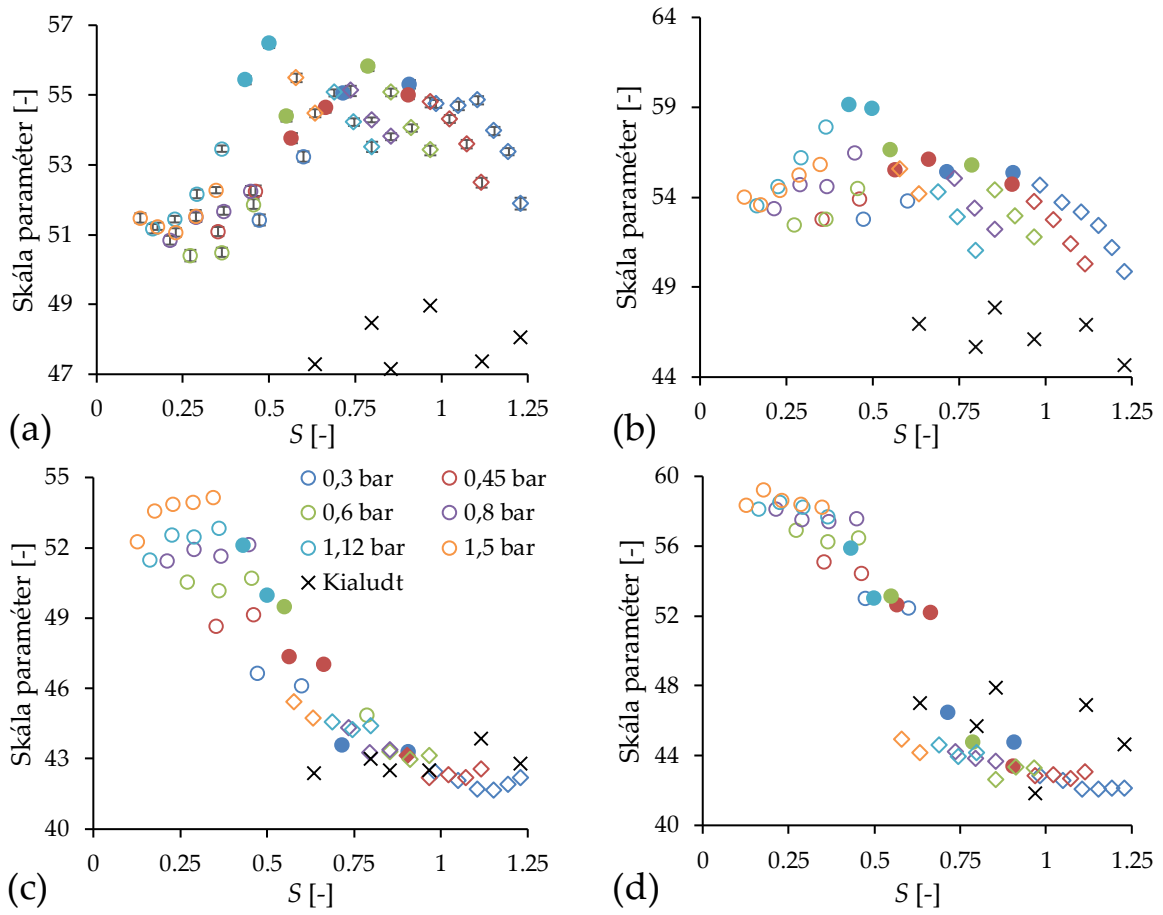
A másik jelenség a 222 Hz és 480 Hz esetén a kialvás után tapasztalható eloszlás. Ha elég szegény keverékig sikerül eljutni a mérés során, akkor a kialvás után közvetlenül tapasztalható spektrum a felhevült égő hatására hasonlíthat a kialvás előtti spekt-

rumra. Azonban ekkor a turbulens áramlás valamennyire mégis elkeni az így tapasztalható, égéshez hasonló spektrumot, ez okozhatja a jelenséget. Láthatjuk, hogy 2500 Hz és 3400 Hz esetén ilyesmit nem tapasztalunk, aminek ahhoz lehet köze, hogy már az égés során sem fordultak elő lényegében ezek a komponensek, így ebben a frekvenciatartományban a láng átviteli függvénye jó közelítéssel egységnyi.

A szemrevételezéssel való vizsgálat során ennél többet nem lehet megállapítani, és a többi mérés esetén is ezeket a jellegeket tapasztaljuk, tehát a behatóbb vizsgálathoz az eloszlás paramétereit és egyéb jellemzőit kell vizsgálnunk.

A következőkben a skála- és az alakparaméter értékeit fogom ábrázolni és elemezni. Elkészítettem a legkisebb, 0,3 bar körüli porlasztónyomású mérések kiértékelését, hogy a diffúzorok esetleges hatását lehessen értékelni, valamint a 15°-os diffúzor különböző porlasztónyomású eseteit is megvizsgálom. Minden esetben az egyenes illetve V alakú pontokat vizsgálom csak, a fenti 4 kiemelt frekvencián.

Először vizsgáljuk meg a skála paramétert. Ez határozza meg, hogy az eloszlás hol helyezkedik el a vízszintes tengelyen, tehát szoros kapcsolatban van a középértékkel és az átlagos értékkel, azonban mivel ez egy paraméter, ami definiálja az eloszlást, ezért inkább ezt ábrázolom az átlagos és középérték helyett. A *3.18. ábra* mutatja a 15°-os diffúzor 6 különböző porlasztónyomása esetén készült görbéket a kiemelt frekvenciák szerinti csoportosításban. Az üres körök az egyenes, az üres gyémánt jelölők pedig a V alakú pontok, a teli kör jelölők pedig azokat a pontokat jelölik, amelyek a spektrum alapján már inkább átmenetinek sorolhatóak. A pontok azért nincsenek összekötve, mivel az átmeneti szakaszt nem tartalmazzák az ábrák és ott nem tudjuk, hogyan viselkedik a skála paraméter. A *3.18. a ábra*, vagyis a 222 Hz-es összetevő elemzése esetén feltüntettem a Matlab által meghatározott, 95%-os konfidencia intervallumhoz tartozó hibasávokat, a többinél maguk az értékek és a konfidencia intervallumok is szinte ugyanakkorák, tehát a legtöbb esetben a jelölő mögül ki sem látszanak, ezért mindegyiknél külön-külön nem vettem fel. A főbb értékek a következők: Átlagos hiba 0,13, hibák szórása 0,03, a relatív hibák pedig 0,12% és 0,6% között változnak. A jelmagyarázat a *3.18. c ábrán* látható, mindegyiknél ugyanazok a színek jelölik ugyanazt a porlasztónyomást. A fekete X-ek az égés nélküli, kialvás utáni állapot értékei a különböző porlasztónyomásokon, külön jelölést nem kaptak porlasztónyomás szerint, láthatóan elég hasonló értékeket vesznek fel, függetlenül a porlasztónyomástól. A perdületszám hibája az esetek döntő többségében (az első egyenes pontokat leszámítva) 2-5%-ig terjed, azonban a diagramok átláthatóságát nagyban csökkentetné, ha feltüntetném őket.



3.18. ábra. 15°-os diffúzor esetén négy kiemelt frekvenciájú összetevő esetén tapasztalható valószínűségsűrűség-függvények skála paraméterei. Frekvenciák: a, 222 Hz ; b, 480 Hz ; c, 2500 Hz ; d, 3400 Hz

A *3.18. a ábra* értékeit megnézve azt látjuk, hogy két elkülönülő csoportba sorolhatóak, az egyenes alakú lángok esetén a skála paraméter 222 Hz-nél nem megy lényegében 53 fölé, míg V alakú láng esetén ez alá. Ne felejtsük el, hogy ez a jellemző összefüggésben van az adott frekvenciát jellemző hangnyomásszint átlagos értékével, tehát lényegében megerősítést nyert az, hogy a 222 Hz-es összetevő az átmeneti szakaszon felerősödik (ha megnézzük a spektrum alapján átmenetinek tűnő mérési pontok jelölőit, akkor látjuk, hogy ezek a legkiemelkedőbbek), majd V alakú láng esetén folyamatosan halkul, de igazából végig nagyobb amplitúdóval rendelkezik, mint egyenes lángnál.

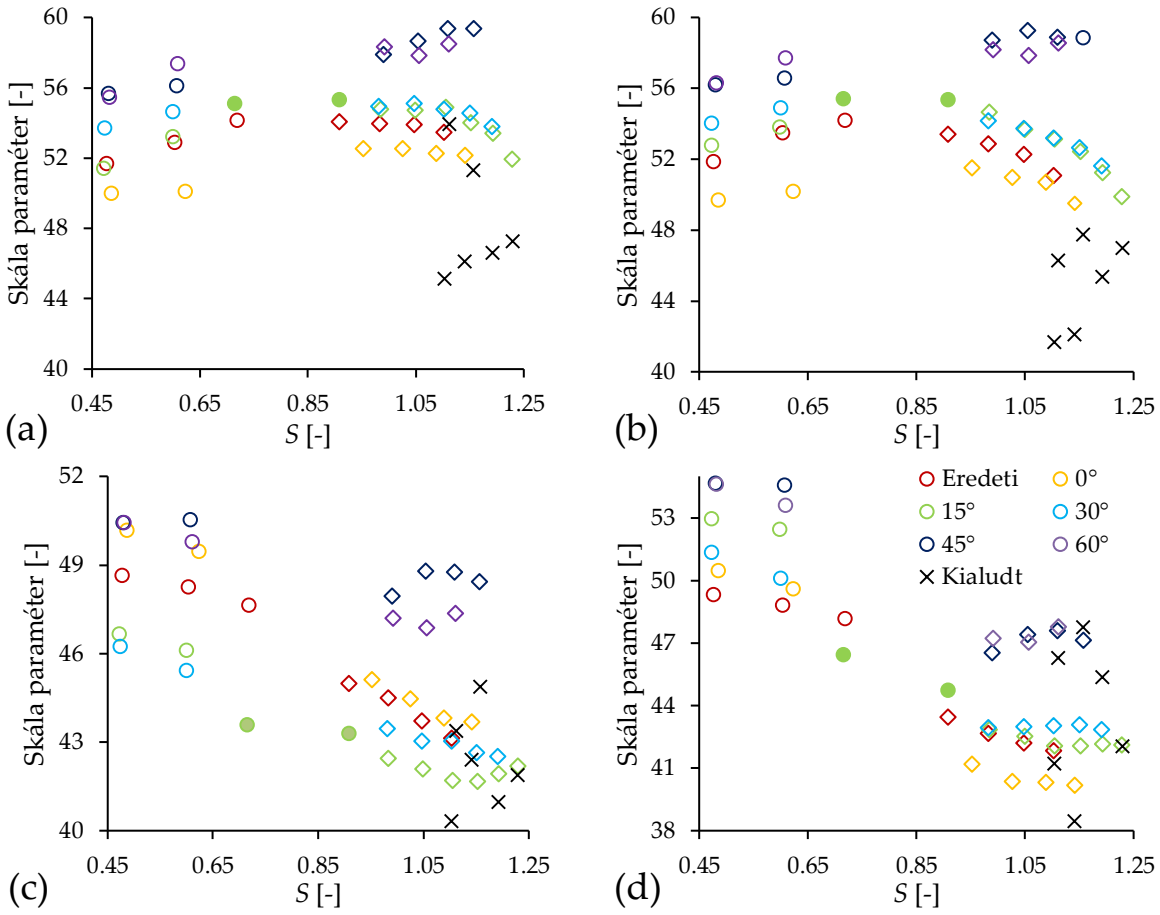
A *3.18. b ábra* esetében nem ezt a viselkedést látjuk, itt az adott porlasztónyomáshoz tartozó értékek skálaparaméterei egy ívet írnak le. Az átmeneti szakaszhoz közeledve növekszik, magát az átmeneti szakaszt nem ismerjük, majd a V alakú szakaszon folyamatosan csökken az értéke. A spektrum vizsgálata során is volt erre a jelenségre utalás, de ezek alapján szabályosabb és jelentősebb ez a folyamat, mint 222 Hz esetén. Sőt, ha megnézzük, akkor az utolsó egyenes és az első V alakú érték közel azonos, ami külön érdekes, a későbbiekben, ha a spektrum vagy a valószínűségsűrűség-függvények elemzését folytatom érdemes megvizsgálni, hogy húzható-e egy határvonal a 480 Hz

körüli frekvenciáknál, ami elválasztja a stabil formákat a kerülendő átmeneti szakasztól.

A *3.18. c ábra*, de főleg a *3.18. d ábra* esetében azt látjuk, hogy igen éles határ van az egyenes és a V alakú mérésekre illesztett Weibull eloszlás skálaparaméterei között. Az egyenes szakaszon a porlasztónyomással folyamatosan nőnek (ám adott porlasztónyomás esetén közel állandóak) az értékek, a V alaknál viszont porlasztónyomástól függetlenül állandóak, a spektrum alapján átmenetinek ítélhető mérési pontok pedig a kettő között helyezkednek el, épp ahogy a spektrum esetében láttuk a 2500 Hz-es és 3400 Hz-es összetevők amplitúdójánál. Az, hogy a V alakú pontok stabilan ugyanazt az értéket veszik fel, arra utal, hogy itt már sem a porlasztónyomás, sem az égéslevegő térfogatáram változása (és így a perdületszám változása) nincs hatással az eloszlás skálaparaméterére, ami megerősíti azt, hogy ezek az összetevők V alakú láng esetén már nem jelennek meg az égés által keltett zajban. A *3.18. d ábra* esetén a kialvás után enyhén nagyobb skálaparaméterek láthatóak, mely eredhet abból, hogy a turbulencia elkeni a spektrumot és ott ezt a változást okozza az eloszlásban, de magának az égésnek is van egy frekvenciafüggő átviteli függvénye, melynek hatására bizonyos frekvenciák hangosabbak lehetnek a kialvás után, mint közvetlenül előtte [23].

A *3.19. ábra* a 0,3 bar porlasztónyomású mérések skálaparamétereit tartalmazza a négy vizsgált frekvencia esetén, különböző diffúzorok alkalmazása mellett a jelölések a *3.18. ábra* jelöléseinek megfelelőek. A *3.19. a ábra* esetében azt látjuk, hogy a diffúzor nélküli, 15°-os és 30°-os esetek hasonló értékeket vesznek fel, a 0°-os kicsit kilóg, de jellegre hasonló, valamint a 30° és 45°-os diffúzorú esetek is hasonlóak egymáshoz, de szintén kilógnak. Ennek oka még vizsgálat alatt van, azonban az látszik, hogy az eredeti és 0°-os, a 15°-os és a 30°-os, valamint a 45°-os és 60°-os más, de páronként hasonló áramképpel bírnak, így a zaj jellege is változik. Adott diffúzoron belül több esetben is lehet határvonalat találni az egyenesek és V alakúak között a *3.19. a ábra* esetén, azonban diffúzortól független határvonal nem azonosítható. A *3.19. b ábra* értékeinél is hasonlóan elmondható, hogy diffúzortól független számot nem lehet mondani az egyenes illetve V alakú felső határára, de a jellegek a 30°-os és 45°-os eseteket leszámítva hasonlóak.

A *3.19. c és d ábra* esetén a diffúzor nélküli és 0°-os, a 15-30 °-os és a 45-60°-os mérések vannak párban ezek közül, főleg a *3.19. d ábrán* csak a 45°-os és 60°-os esetek lógnak ki, a többi hasonló karakterisztikát mutat. A V alaknál tapasztalható skálaparaméter sem független a diffúzortól, azonban a jelleg hasonló a kilógó nagyobb félkúpszögű eseteknél is, a többinél pedig, főleg a *3.19. d ábrán* túlzottan nagy eltérés nem tapasztalható. A kialvás utáni skála paraméterek itt is elég közel esnek a V alakúakhoz 2500 Hz és 3400 Hz esetén.

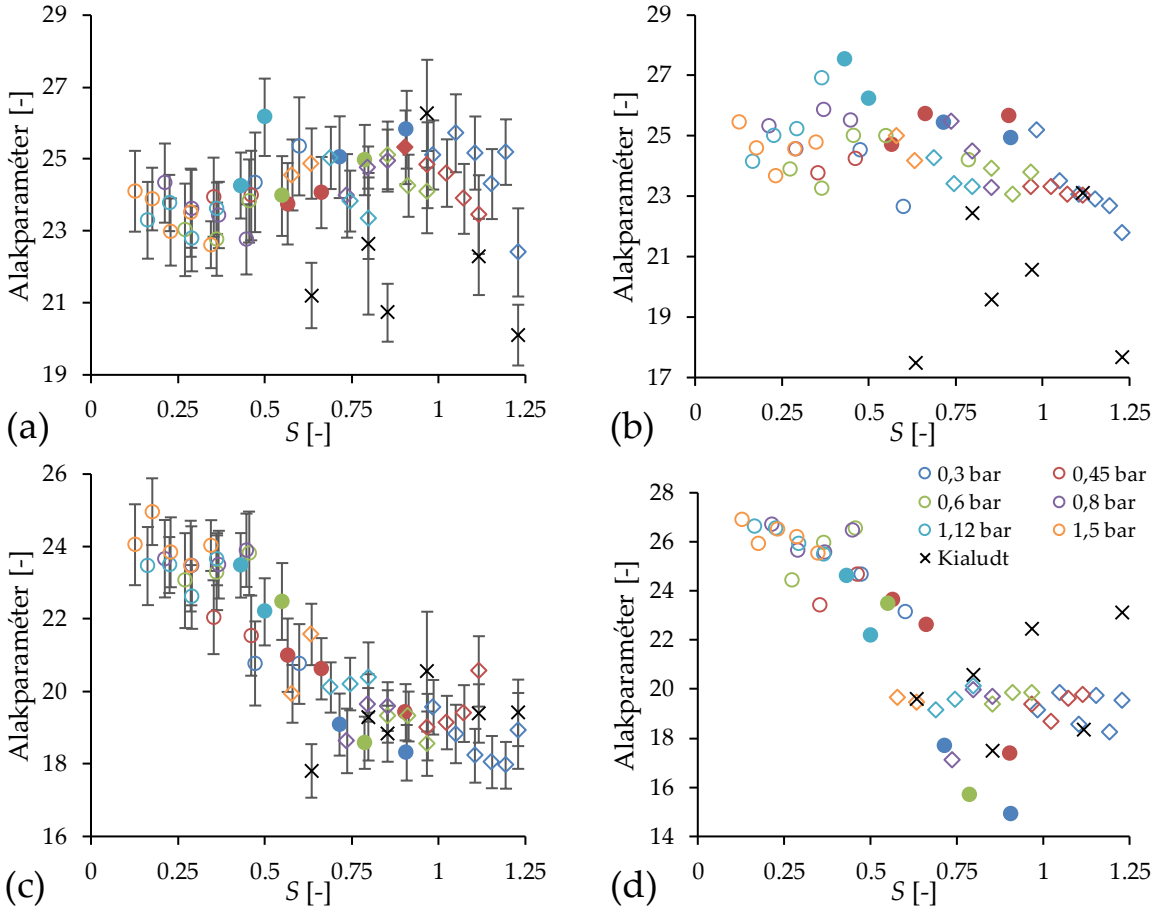


3.19. ábra. A 0,3 bar porlasztónyomású mérések skála paraméterei különböző diffúzorok alkalmazása esetén a kiemelt frekvenciákon. Frekvenciák: a, 222 Hz ; b, 480 Hz ; c, 2500 Hz ; d, 3400 Hz

Folytatásként végezzünk hasonló elemzést az alakparamétereken. Először tekintsük a 15°-os diffúzor különböző porlasztónyomású eseteinek 222 Hz, 480 Hz, 2500 Hz és 3400 Hz frekvenciájú összetevőit, melyek a *3.20. ábra* diagramjain láthatóak. A *3.20. a ábra* (222 Hz) és *3.20. b ábra* (2500 Hz) értékeihez felvittem a Matlab által meghatározott 95%-os konfidencia intervallumot jelző hibasávokat, a többinél viszont nem jelöltem, mivel az értékek nagyon hasonlóak és a hibasávok csökkentenék az áttekinthetőséget. A jelölők használta a *3.18. ábra* esetén leírtaknak megfelelő.

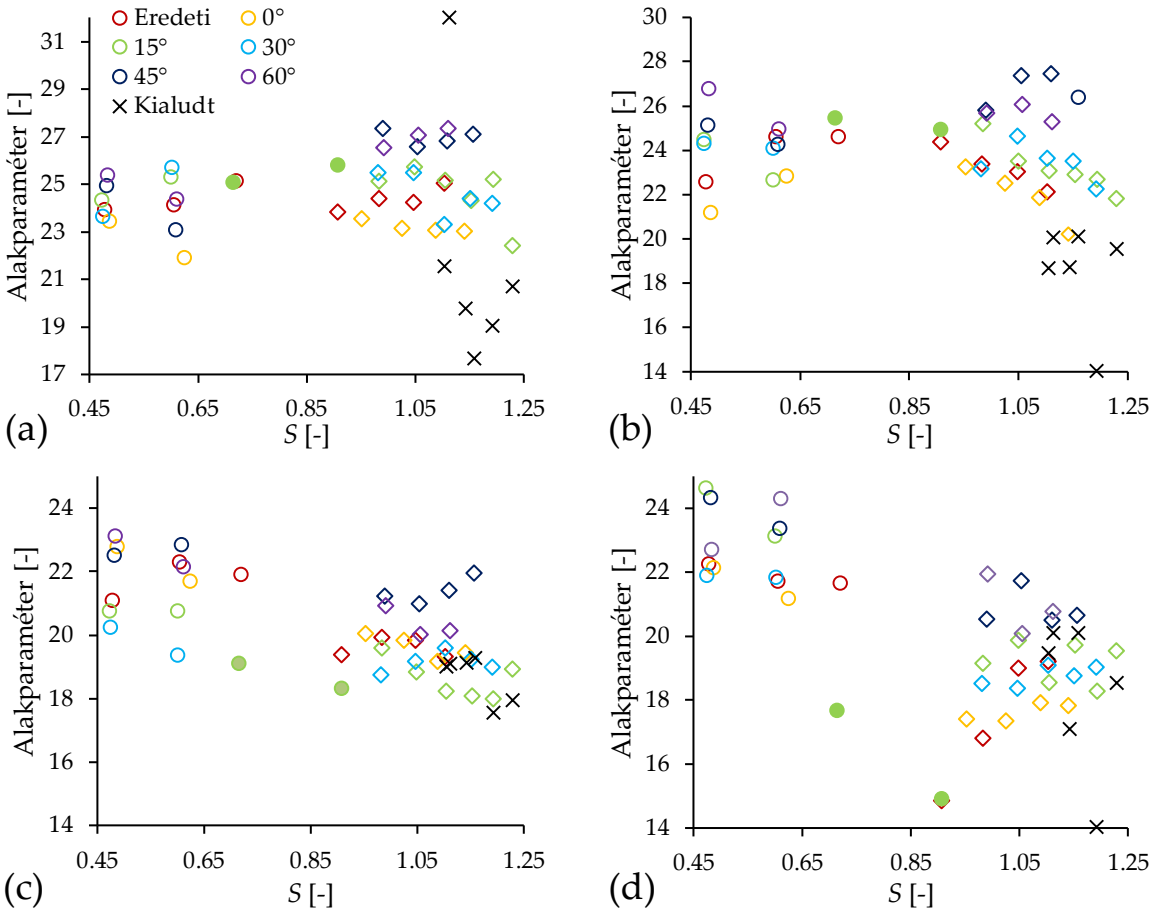
A *3.20. a és b ábra* esetében elég szabálytalanul változik az alakparaméter, a konfidencia intervallumok pedig lényegében összeérnek és egy egybefüggő sávot alkotnak. Ennyi információ alapján nem lehet további következtetéseket levonni, csak annyit, hogy hasonlóak az alakparaméterek, azonban a *3.20. c és d ábra* eseteit is elemezve már egyéb következtetéseket is levonhatunk. Az egyenes alakú láng esetében illesztett valószínűségsűrűség-függvények alakparamétere a 222 Hz és 480 Hz frekvenciájú komponensekéhez hasonló értékű, nagyjából hasonló nagyságú intervallumba esik. Ellenben a V alakúhoz tartozó alakparaméterek (ahogy ez a *3.20. c ábra* hibasávaiból is látszik) a konfidencia intervallumnál egyértelműen jobban eltérnek az egyenesektől, lényegében abba az intervallumba esnek, ahol a kialvás utáni eloszlásfüggvény alakparaméterei vannak. A fentieket megfontolva azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a 222 Hz-en és 480 Hz-en végig, valamint a 2500 Hz-en és 3400 Hz-en egyeneseknél tapasztalható ~22-26 -os értékű alakparaméter az égés zajához köthető, míg a nagyobb

frekvenciáknál V alak esetén tapasztalható ~18-20 –as alakparaméter az égési zajtól független áramlási zajhoz. Ez ismét megerősíti azt, hogy a nagyobb frekvenciákon a V alakú láng esetén spektrálisan sem és statisztikailag sem látunk különbséget az égés nélkül kiáramló tüzelőanyag-levegő keverék zajához képest.



3.20. ábra. 15°-os diffúzor esetén négy kiemelt frekvenciájú összetevő esetén tapasztalható PDF-ek alakparaméterei. Frekvenciák: a, 222 Hz ; b, 480 Hz ; c, 2500 Hz ; d, 3400 Hz

A *3.19. ábra* mintájára alakparaméter esetén is elkészítettem a diffúzorok összehasonlítását, melyet a *3.21. ábra* mutat. A *3.21. a ábra* diagramjairól most is azt látjuk, hogy az értékek néhol elég szabálytalanul, de nagyjából hasonlóan alakulnak, a *3.21. b ábra* esetében talán van egy kis ívük, bár a konfidencia intervallumok itt is elég nagyok, tehát nagy bizonyossággal nem lehet állítani. A *3.21. c és d ábra* diagramjain várnánk az éles eltérést az egyenes és V alakú lángok között, azonban ez enyhén látszik csupán, de ha megnézzük a *3.19. c és d ábrákon* is a 0,3 bar porlasztónyomáshoz tartozó alakparamétereknél jött ki legkevésbé a különbség. Összességében azt elmondhatjuk, hogy a különböző diffúzorok hasonló alakparamétereket adnak, azonban a 45°-os és 60°-os diffúzor értékei itt is némileg eltérő jelleget mutatnak.



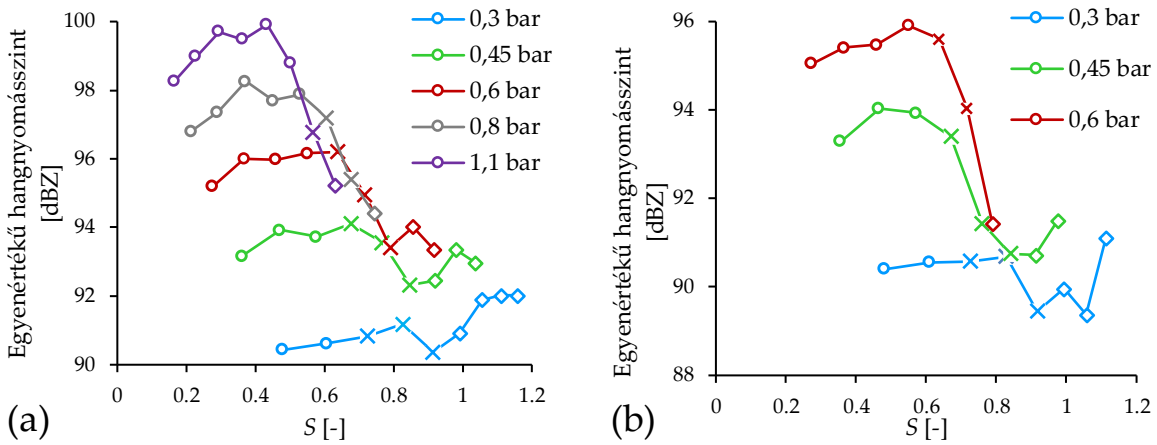
3.21. ábra. A 0,3 bar porlasztónyomású mérések alakparaméterei különböző diffúzorok alkalmazása esetén a kiemelt frekvenciákon. Frekvenciák: a, 222 Hz ; b, 480 Hz ; c, 2500 Hz ; d, 3400 Hz

A továbbiakban ezzel a témával is érdemes foglalkozni. Egyrészt az összes többi mérési beállítás esetén vizsgálatokat végezni, másrészt az átmeneti szakaszok esetében is illeszteni valószínűségsűrűség-függvényt, valamint egyéb frekvenciák vizsgálata is érdekes lehet.

3.6. Az egyenértékű hangnyomásszint kapcsolata az égés paramétereivel

Ebben az alfejezetben a tavalyi TDK dolgozatom közvetlen folytatásának mondható eredményeimet ismertetem. Az *Irodalmi áttekintésben* is említettem a tavalyi dolgozat egyik ígéretes eredményét, mely szerint V alakú láng esetén az egyenértékű hangnyomásszint közel lineárisan csökken a perdületszám növekedésével. Az alábbiakban ezt a témát járom körül. A kiértékelés során csak a Z szűrős görbéket tüntetem fel, az A szűrős esetek ezekhez nagyon hasonlóak. A végkonklúzió levonásakor beillesztem az A szűrővel kapott eredményeket is, hogy látható legyen a hasonlóság.

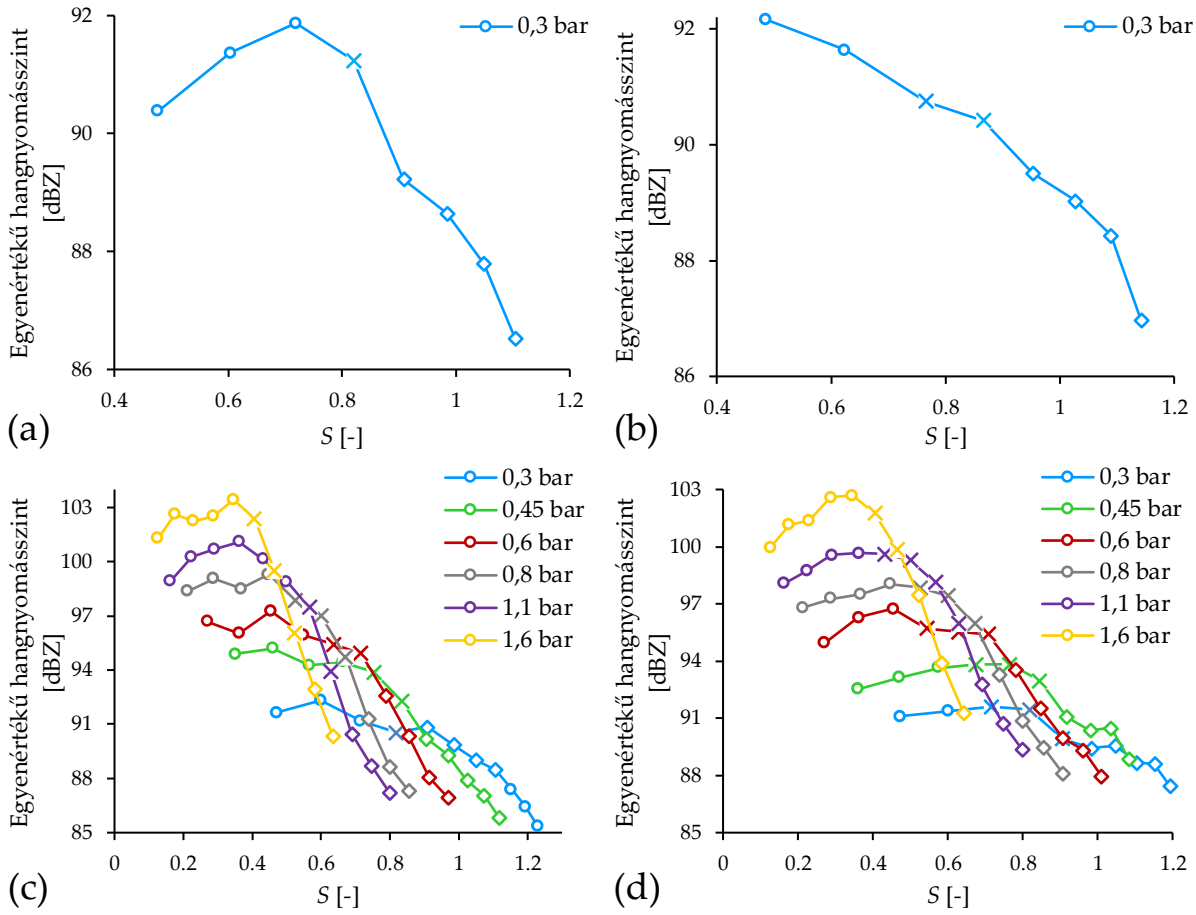
Jelen vizsgálatban a diffúzor nélküli, valamint a 0°-os, 15°-os és 30°-os diffúzorok alkalmazásakor készült mérésekkel foglalkoztam, ám mielőtt belekezdenék a kiértékelésbe szemléltetem, hogy a 45°-os és 60°-os diffúzorok miért maradtak ki a vizsgálatból. A *3.22. ábra* az említett diffúzorok azon eseteit tartalmazza, amikor megjelent V alak a mérés során. Az üres kör jelölők az egyenes, az X az átmeneti, a gyémánt jelölők pedig a V alakú mérési pontokat mutatják.



3.22. ábra. Az egyenértékű hangnyomásszint a perdületszám függvényében: 45°-os (a,) és 60°-os (b,) diffúzorok esetén.

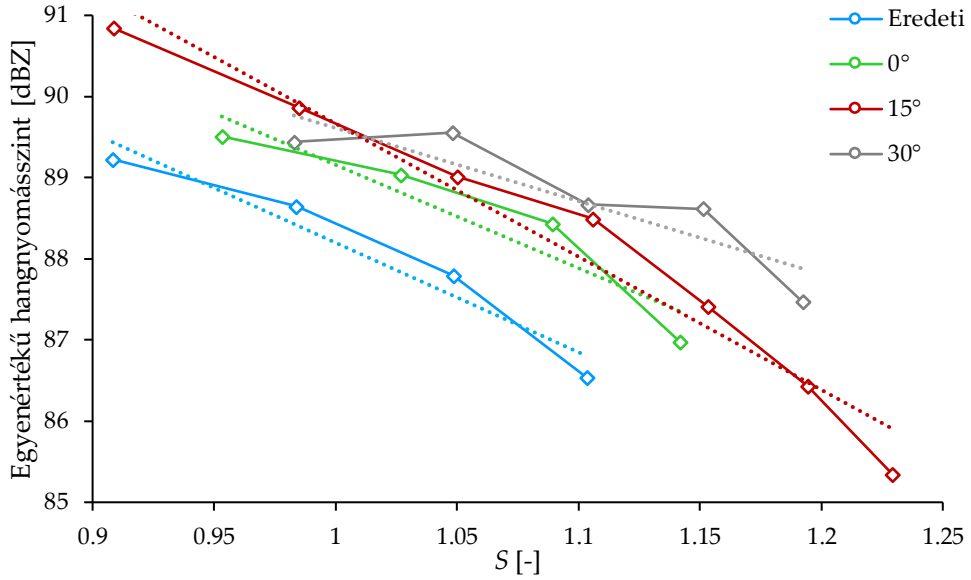
A diffúzorok nagy nyílásszöge miatt az áramlási zaj is eltér az összes többi esettől. Korábban is láttuk (pl. *3.19. ábra*), hogy a 45°-os és 60°-os diffúzor kilóg kissé a többi közül és egyenértékű hangnyomásszint tekintetében, főleg kisebb nyomásokon nem lehet a V alakú mérési pontok esetén lineáris, perdületszámtól függő jelleget felfedezni. Ahogy növeljük a nyomást, mintha egyre inkább kezdene hasonlítani a többi diffúzor méréseire, de ott már nem volt megfelelő számú stabil V alakú pont az érvényes következtetések levonásához.

A *3.23. ábra* hasonló jelöléssel tartalmazza diffúzoronként szétválogatva a méréseket, melyek közül valamennyi mérés V alakú szakaszának karakterisztikája szerepel a későbbi kiértékelésben.



3.23. ábra. Egyenértékű hangnyomásszint a perdületszám függvényében az eredeti kialakítás (a,), a 0°-os (b,), 15°-os (c,), valamint 30°-os (d,) diffúzorok esetén különböző porlasztónyomásokon.

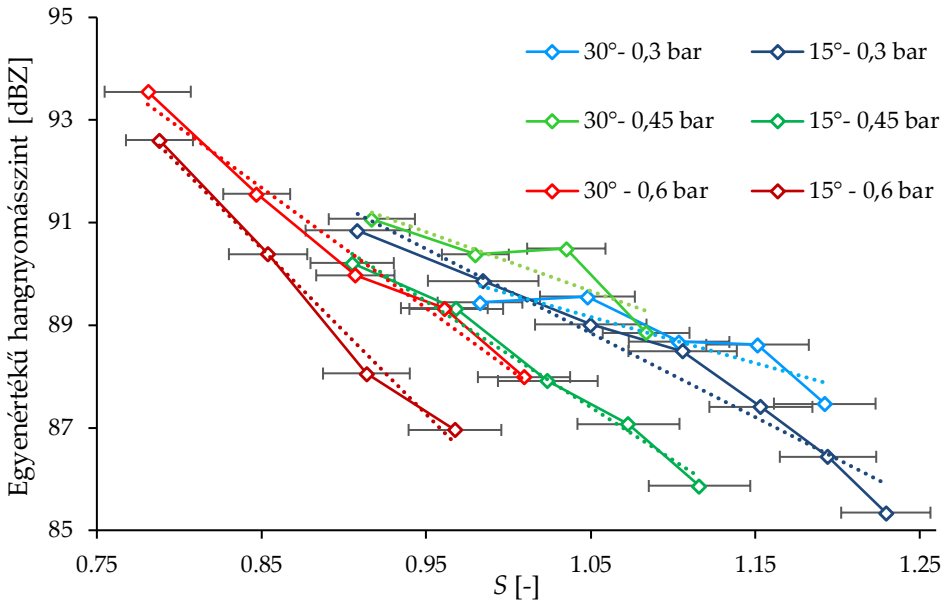
Mint látható az eredeti kialakítás és a 0°-os diffúzor (lényegében a keverőcső megtoldása) esetében csak a 0,3 bar-os porlasztónyomás esetén fordult elő stabil V alakú láng. A kiértékelést ennek megfelelően úgy kezdem, hogy először összehasonlítom a legkisebb porlasztónyomású méréseket valamennyi diffúzor esetén. Mivel ez az alfejezet a stabil V alakú pontokra fókuszál, ezért a *3.24. ábra* már csak ezeket tartalmazza.



3.24. ábra. Egyenértékű hangnyomásszint a perdületszám függvényében a 0,3 bar-os mérések V alakú mérési pontjainál eredeti kialakítás, valamint 0°, 15° és 30° félkúpszögű diffúzorokkal

A diagramon lineáris trendvonalakat alkalmaztam, melyeknek az R^2 értékei az eredeti, 0°-os, 15°-os és 30°-os esethez rendre 0,94; 0,89; 0,96 és 0,80. Két következtetést lehet ebből levonni: Az egyik az, hogy a lineáris trendvonal igen jó illeszkedést mutat, valóban ilyen trendet követ az egyenértékű hangnyomásszint, a másik, hogy az adott porlasztónyomás esetén közel hasonló meredekségű görbék adódnak a diffúzor félkúpszögétől függetlenül.

A következőkben kiterjesztem a vizsgálatot, elemezve a 15°-os és 30°-os diffúzor alkalmazása esetén valamennyi porlasztónyomást. A *3.25. ábra* ezen két diffúzor 0,3 bar, 0,45 bar és 0,6 bar körüli porlasztónyomáson készült, V alakú mérési pontjait tartalmazó egyenértékű hangnyomásszint-perdületszám görbéi közül mutatja azokat, melyeknél 4 vagy több stabil V alakú pont van. Az ábrán feltüntettem a perdületszám mérési hibáit is (valamennyi esetben 2-4% között van), azonban a többi diagramon az áttekinthetőség érdekében nem ábrázolom.



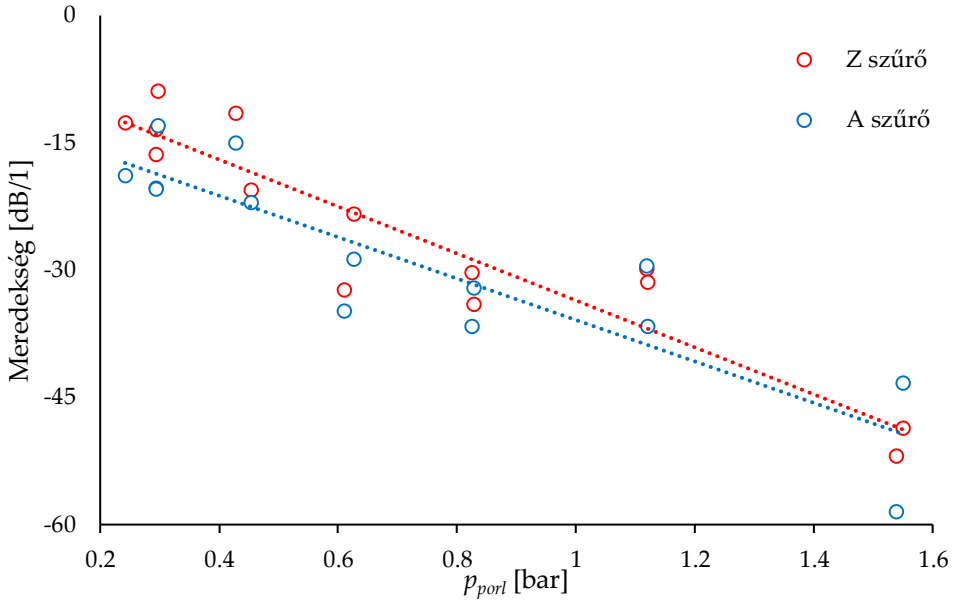
3.25. ábra. Különböző porlasztónyomású mérési pontok egyenértékű hangnyomásszint - perdületszám görbéi 15°-os és 30°-os diffúzor alkalmazása mellett

A diagramon a hasonló porlasztónyomású eseteket hasonló színnel jelöltem a két diffúzor esetén. Látható, hogy valamennyi esetben elég jó közelítést ad a lineáris trendvonal (az esetek nagy részében 0,96-0,98 az R^2 értéke), valamint diffúzortól szinte függetlenül nagyon hasonló a meredekség adott porlasztónyomás esetén. Sőt, ahogy növeljük a porlasztónyomás értékét, a stabil V alakú szakasz meredeksége annál nagyobbnak tűnik. A *3.5. táblázatban* összegyűjtöttem valamennyi esetre (*3.23. ábra*) az illesztett lineáris trendvonal meredekségét, metszéspontját és R^2 értékét. Egyetlen olyan pont van, ahol 2 mérési pontra illesztettünk trendvonalat, ezeknél az R^2 értéke nyilvánvalóan 1.

3.5. táblázat. A 3.23. ábra görbéinek V alakú pontjaira illesztett egyenesek adatai.

p_{porl} [bar]	Θ [°]	Z szűrő			A szűrő		
		Meredekség [dB/1]	Metszéspont [dB]	R^2	Meredekség [dB/1]	Metszéspont [dB]	R^2
0,294	-	-13,49	101,69	0,944	-20,43	104,75	0,970
0,242	0	-12,73	101,88	0,885	-18,91	104,62	0,924
0,295	15	-16,40	106,07	0,963	-20,45	106,52	0,996
0,454	15	-20,63	109,06	0,989	-22,05	106,44	0,997
0,610	15	-32,33	117,98	0,988	-34,85	116,45	0,965
0,829	15	-34,09	116,24	0,974	-32,10	110,95	0,964
1,120	15	-29,95	111,10	0,999	-29,54	107,30	0,999
1,550	15	-48,66	121,19	1	-43,40	114,89	1
0,297	30	-9,01	98,62	0,802	-13,01	99,09	0,934
0,428	30	-11,51	101,75	0,763	-15,10	101,83	0,722
0,627	30	-23,49	111,65	0,983	-28,78	113,08	0,980
0,826	30	-30,29	115,43	0,987	-36,65	117,09	0,994
1,121	30	-31,45	114,39	0,993	-36,70	115,15	0,998
1,540	30	-51,93	124,50	0,994	-58,48	125,58	0,990

Ábrázoltam a porlasztónyomások és a hozzájuk tartozó stabil V alakú mérési pontokra illesztett lineáris trendvonalak meredekségét, ezt mutatja a *3.26. ábra*. Ebben az esetben a diffúzorok között nem tettem különbséget, valamint feltüntettem az előzőekben leírt gondolatmenet alapján meghatározott eredményt A szűrős esetre is. Az R^2 értéke Z szűrős esetben 0,88, A szűrő esetén 0,80.

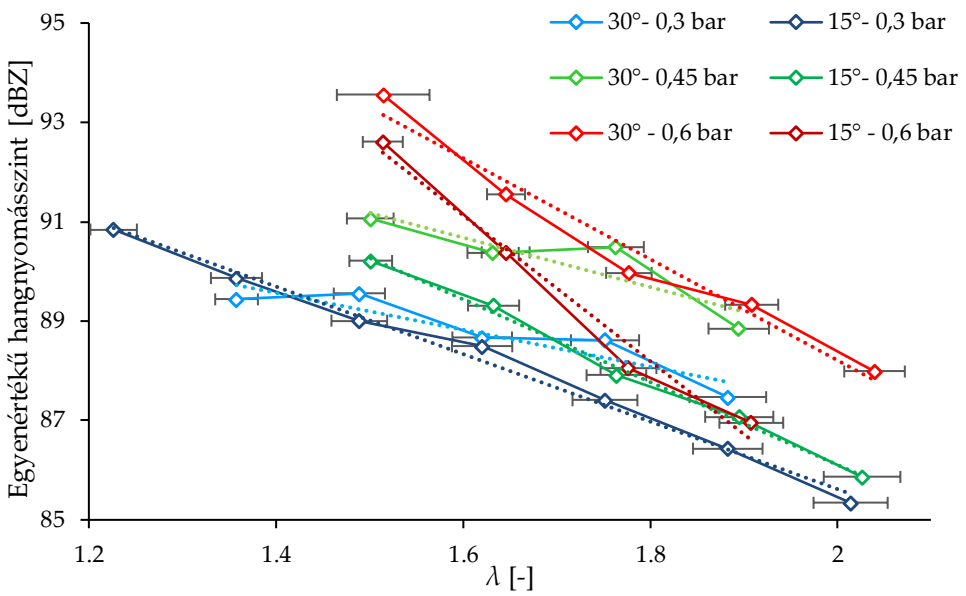


3.26. ábra. Meredekségek a porlasztónyomás függvényében.

Megállapítható, hogy a V alakú szakaszokra illesztett egyenesek meredekségei lineáris kapcsolatban vannak a porlasztónyomással. Mivel adott porlasztónyomáson, stabil V alakú láng esetén az egyenértékű hangnyomásszint és a perdületszám között lineáris kapcsolat van, valamint ezen kapcsolatot leíró egyenes meredeksége és a porlasztónyomás között szintén lineáris kapcsolat van, ezért perdületes dízelolaj tüzelés esetén kapcsolat teremthető a porlasztónyomás, egyenértékű hangnyomásszint és a perdületszám között, lineáris összefüggések használatával.

A fenti vizsgálat finomítható lenne, ha a spektrum alapján módosítanánk a lángalakok megítéléseit, azonban ez még további megfontolást igényel, egyelőre azok a mérési pontok vannak V alakúnak jelölve, amelyeket a szemrevételezés is annak látott.

A mérés során az égéslevegő térfogatáramának növelésével nem csak a perdületszám nőtt, hanem a légfelesleg tényező is, a *3.25. ábra*, *3.26. ábra* és *3.5. táblázat* megfelelőit láthatjuk alább.



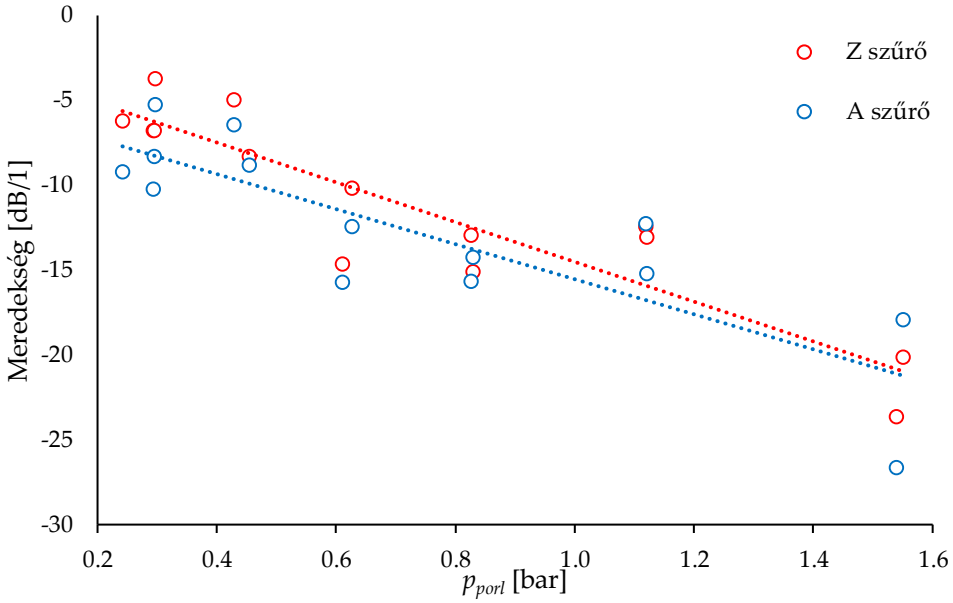
3.27. ábra. Az egyenértékű hangnyomásszint-légfelesleg tényező görbék V alakú mérési pontjaira illesztett trendvonalak különböző porlasztónyomások mellett 15°-os és 30°-os diffúzor esetén.

A *3.27. ábra* görbéit megnézve látjuk, hogy az adott porlasztónyomás esetén diffúzortól függetlenül hasonló a meredekség, valamint a porlasztónyomás növelésével enyhén meredekebbé válik. A *3.6. táblázat* tartalmazza a légfelesleg tényezők vizsgálata során illesztett trendvonalak adatait, valamint a porlasztónyomásokat.

3.6. táblázat. Az egyenértékű hangnyomásszint - légfelesleg tényező görbék V alakú szakaszaira illesztett trendvonalak adatai.

p_{porl} [bar]	Θ [°]	Z szűrő			A szűrő		
		Meredekség [dB/1]	Metszéspont [dB]	R^2	Meredekség [dB/1]	Metszéspont [dB]	R^2
0,294	-	-6,80	97,73	0,972	-10,25	98,69	0,989
0,242	0	-6,25	97,38	0,926	-9,24	97,85	0,956
0,295	15	-6,79	99,21	0,993	-8,33	97,73	0,993
0,454	15	-8,33	102,76	0,995	-8,83	99,58	0,987
0,610	15	-14,68	114,62	0,979	-15,75	112,70	0,946
0,829	15	-15,14	116,23	0,966	-14,24	110,92	0,955
1,120	15	-12,44	112,95	0,997	-12,28	109,13	0,998
1,550	15	-20,13	129,88	1	-17,95	122,63	1
0,297	30	-3,71	94,77	0,854	-5,29	93,41	0,968
0,428	30	-4,97	98,64	0,794	-6,47	97,65	0,738
0,627	30	-10,17	108,56	0,97	-12,46	109,28	0,966
0,826	30	-12,95	114,50	0,978	-15,70	116,02	0,989
1,121	30	-13,06	116,31	0,99	-15,25	117,41	0,995
1,540	30	-23,68	137,63	0,992	-26,66	140,35	0,987

Végül, de nem utolsó sorban a *3.28. ábra* tartalmazza a *3.6. táblázat* adatait diagramon feltüntetve. Látható, hogy itt is feltételezhető a lineáris trend mind az egyenértékű hangnyomásszint és légfelesleg-tényező kapcsolatában, mind a porlasztónyomás és a V alakú tartomány meredekségének esetében (az R^2 értéke Z szűrőnél 0,83, A szűrőnél 0,71).



3.28. ábra. A 3.6. táblázat adataiból készített diagram.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban egy perdítőelemes, előkeveréses, előpárologtató rendszerű égő zaját vizsgáltam dízelolaj tüzelése mellett. Alapvetően két aspektusból vizsgáltam a lángot, egyrészt spektrálisan, másrészt az egyenértékű hangnyomásszintre koncentrálva.

A spektrális vizsgálat során különböző porlasztónyomások és geometriai kialakítások (különböző félkúpszögű, égőszájra helyezett diffúzorok) mellett, különböző égéslevegő térfogatáramok esetén vizsgáltam a mikrofon által rögzített zaj spektrumát. Az égéslevegő térfogatáramának növelésével nőtt a légfelesleg és a perdületszám, valamint a láng átesett egy alakváltáson, kezdve az egyenes lángalakkal, eljutva egy szétnyílt, aerodinamikailag indukált recirkuláló örvényekkel stabilizált V alakig, áthaladva egy átmeneti szakaszon, ahol véletlenszerűen váltakozik a két stabil forma. A spektrum elemzésével alapvető különbségek fedezhetők fel a három lángstabilitási fázis között. Egyenes láng esetén nagyjából 500-3500 Hz között tapasztalunk jelentős amplitúdójú összetevőket, ezek közül kiemelkedő a 3400 Hz körüli tartomány, valamint az átmeneti szakasz környékén az 500 Hz körüli tartomány. Átmeneti esetben a néhány kHz-es összetevők fokozatosan elhalnak, ahogy egyre inkább V alakú a láng, a néhány száz Hz-es összetevők pedig felerősödnek, majd halkulni kezdenek, mely halkulás folyamatos, ahogy növeljük az égéslevegő mennyiségét és közeledünk a lángkialváshoz. V alak esetén számottevő égési zajt 1,5-2 kHz alatt tapasztalunk, fölötte az égés nélküli tüzelőanyag-levegő keverék áramlásának a zaja nem különbözik lényegében az égő keverékétől.

A spektrális vizsgálatnak a részét képezte továbbá a csúcsfrekvenciák felderítése és az ezeknek megfelelő komponensek statisztikai vizsgálata valószínűségsűrűség-függvényekkel. A csúcsvizsgálat még jobban alátámasztotta azt, amit a spektrum elsődleges vizsgálata mutatott, megerősítette, hogy egyenes esetben a 3400 Hz, az egyenes és átmeneti határán a 480 Hz, V alakú esetben a 220 Hz a legjelentősebb komponens, átmeneti esetben pedig 220 Hz és 480 Hz között ugrál a csúcsfrekvencia. A statisztikai vizsgálat enyhén ráerősített ezekre is, azonban a nagyobb eredmény, hogy statisztikailag sem látszik különbség 2500 Hz-en és 3400 Hz-en az égő V alakú keverék és az égés nélkül áramló tüzelőanyag-levegő keverék között, így ezeket a komponenseket vélhetően a turbulencia spektrális viselkedése irányítja, a hőfelszabadulás moduláló szerepe elenyésző.

Az egyenértékű hangnyomásszint vizsgálata szorosabban kapcsolódik a tavalyi TDK dolgozatomhoz, amely kapcsán felmerült, hogy az egyenértékű hangnyomásszint és a perdületszám között V alakú esetben jó közelítéssel lineáris kapcsolat van. Ennek mélyebb megvizsgálása során arra jutottam, hogy nem csak ez a kapcsolat lineáris, hanem az egyenértékű hangnyomásszint-perdületszám függvény meredekségének és a porlasztónyomásnak a kapcsolata is lineáris összefüggést mutat, így az egyenértékű hangnyomásszint, perdületszám és porlasztónyomás között lineáris összefüggésekkel leírható kapcsolat fedezhető fel. A vizsgálatot kiterjesztettem a légfeleslegtényezőre is, ahol ugyanígy megtalálható a lineáris kapcsolat az egyenértékű hangnyomásszint, légfelesleg-tényező és porlasztónyomás között.

Az eddigi kutatás és a dolgozat elkészítése során számos eredmény született, melyek újabb kérdéseket, lehetőségeket vetnek fel. A spektrum és az üzemi paraméterek kapcsolatának vizsgálata még folytatható, azonosíthatóak a kiemelkedő frekvenciák eredetük szerint, valamint a láng alakjával és a különböző üzemi paraméterekkel való összefüggések keresése is megfontolandó. Ezen kívül egyéb spektrális vizsgálati módszerek - például Wavelet transzformáció - alkalmazása is tervben van. A valószínűség-sűrűség-függvények alkalmazásával való behatóbb vizsgálat még nagyon az elején jár, de a matematikai háttér és a Matlab programozási lehetőségek megismerése után még további eredményekre is juthatunk. Az egyenértékű hangnyomásszint vizsgálata egyrészt folytatható az irányba, hogy erről a jelenségről részletesebb, általánosabb képet kapjunk, másrészt érdemes még vizsgálni az egyenes láng esetén mért hangnyomásszinteket, hátha az egyes jelenségek egy ilyen egyszerű mérőszámmal is kellő bizonyossággal korreláltathatóak.

5. SUMMARY

In this paper, the acoustics of a swirl-stabilized, lean-premixed, prevaporized diesel oil flame was investigated. The two main topics were the spectral characteristics and the overall sound pressure level (OASPL).

In the spectral characteristics investigation, different atomizing pressures and burner constructions (diffusers with different half-cone angles) were examined, and the combustion air flow was also a changing parameter. By increasing the combustion air flow rate, the air-to-fuel equivalence ratio decreased and the swirl number increased. Also, by increasing the swirl number, two different stable flame structure (straight and V-shaped) and a transitory region were observed. In the transitory region, the two stable structure changed randomly. The results show different spectral characteristics between the three state. In case of straight flame, a wide band of the spectrum (500-3500 Hz) has significant amplitude, with a peak frequency of 3400 Hz and (closer to the transitory region) 500 Hz. In the transitory region, the 1-3,5 kHz band is continuously decreasing, while the 200-500 Hz band is increasing at the border of straight/transitory flame and then decreasing continuously until blowout. The V-shaped flame has a very stable spectrum between 200-2000 Hz with a little decreasing if the swirl number is increased, while the spectrum above 2 kHz is almost the same as the spectrum right after the blowout.

Finding the peak frequency in the different states and investigating them with probability density functions (PDF) was part of the spectral analysis. The peak frequency examination corroborated with the primary spectral investigation and showed that the straight flame has a peak frequency of 3400 Hz at lower swirl number and 480 Hz near the transitory regime, the V-shaped flame has a peak frequency of 220 Hz, and in the transitory region, 480 Hz and 220 Hz are alternating. The statistical examination also corroborated with the primary spectral investigation, but the main result was that in case of V shaped flame, over 2500 Hz the spectrum is statistically the same as right after the blowout, so the behavior of these components are driven by the turbulence, and the effect of heat release is negligible.

In the previous research, the connection between the overall sound pressure level and the swirl number was examined, and this investigation was continued. The results showed that in case of V-shaped flame, there is a linear relationship between the OASPL and the swirl number, furthermore, the relationship between the slope of this linear trend is the linear function of the atomizing pressure. So a connection between OASPL, swirl number and atomizing pressure can be found using only linear relationships. The same connection was also found between OASPL, air-to-fuel ratio, and the atomizing pressure.

This research already has some interesting results and there is surely more connection to find. The spectral analysis can be continued by determining the source of peak frequencies and finding the connection between spectral components and operating conditions. Furthermore, there are other ways to examine the spectral characteristics, for example, Wavelet analysis. In order to get more information by

probability density functions, a better mathematical and Matlab programming knowledge is needed, but it is in progress. By the further investigation of the overall sound pressure level, a better understanding of mentioned phenomenon can be achieved and also it is promising to examine the OASPL, and its connection with the operating parameters during straight flame, because it is an easily measurable parameter.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

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

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

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

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

[5] A. Lefebvre, D. Ballal, és D. Bahr, *Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions*, harmadik kiadás. 2010.

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

[7] J. Rayleigh, *The theory of sound*, második kiadás. New York: Dover, 1945.

[8] C. E. Johnson, "Adaptive control of combustion instabilities using real-time modes observation", PhD disszertáció, Georgia Institute of Technology, 2006.

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

[10] S. Taamallah, Z. A. Labry, S. J. Shanbhogue, M. A. M. Habib és A. F. Ghoniem, "Correspondence Between ' Stable ' Flame Macrostructure and Thermo-acoustic Instability in Premixed Swirl-Stabilized Turbulent Combustion," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 137, Július, 2015, pp. 1–12, 2015.

[11] A. V Singh, M. Yu, A. K. Gupta és K. M. Bryden, "Investigation of noise radiation from a swirl stabilized diffusion flame with an array of microphones," vol. 112, pp. 313–324, 2013.

[12] J. R. Mahan, "A Critical Review of Noise Production Models for Turbulent, Gas-Fueled Burners," *NASA Contract. Rep. 3803*, 1984.

[13] S. Kotake és K. Takamoto, "Combustion Noise: Effects of the shape and size of burner nozzle," *J. Sound Vib.*, vol. 112, pp. 345–354, 1987.

[14] R. N. Kumar, "Further experimental results on the structure and acoustics of turbulent jet flames," *AIAA Pap.*, no. 1975–523, pp. 483–508, 1975.

[15] A. V Singh, M. Yu, A. K. Gupta és K. M. Bryden, "Thermo-acoustic behavior of a swirl stabilized diffusion flame with heterogeneous sensors," *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 1–16, 2013.

[16] N. Noiray és A. Denisov, "A method to identify thermoacoustic growth rates in combustion chambers from dynamic pressure time series," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 3, pp. 3843–3850, 2017.

[17] J.M.Beér és N.A.Chigier, *Combustion Aerodynamics*. Robert E. Krieger Publishing Company, 1983.

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

[19] Novotni G. I., "Lángstabilitás akusztikai vizsgálata", TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2016.

[20] "Studiotips honlap." [Online]. Utolsó elérés: 2017.10.31. http://forum.studiotips.com/viewtopic.php?f=1&t=3806.

[21] Novotni G. és Józsa V., *XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka*, Kolozsvár, 2017.03.23 - 2017.03.24, XXII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka előadásai, pp. 319-322, Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2017.

[22] A. Papoulis és U. Pillai, *Probability, random variables , and stochastic processes*, negyedik kiadás, The McGraw-Hill Companies, Inc, 2002.

[23] P. Palies, D. Durox, T. Schuller és S. Candel, "Nonlinear combustion instability analysis based on the flame describing function applied to turbulent premixed swirling flames," *Combust. Flame*, vol. 158, no. 10, pp. 1980–1991, 2011.

7. FÜGGELÉK

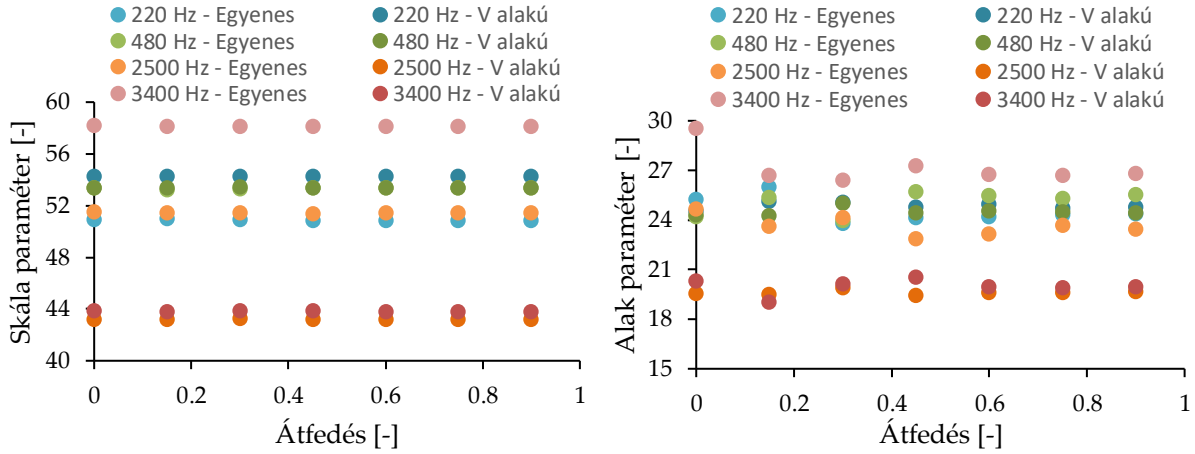
7.1. Egyenértékű hangnyomásszint és hiba

Az alábbi linken elérhető egy táblázat, mely tartalmazza a perdületszámokat, légfelesleg-tényezőket, az ezekhez tartozó hibát, illetve a Z és A szűrős egyenértékű hangnyomásszinteket valamennyi mérési pont esetén.

https://goo.gl/CW5Zf7

7.2. Az átfedés hatása

A *7.1. ábra* azt mutatja, hogy egy adott diffúzorú és porlasztónyomású mérés esetén (konkrétan a 15°-os diffúzor 0,83 bar porlasztónyomású mérése) egy kiválasztott egyenes, illetve egy V alakú pont esetén hogyan változik a skála- és az alakparaméter, ha növeljük az átfedés értékét. Látható, hogy a skála paraméter szinte semennyit nem változik, alakparaméter esetén pedig nagyobb átfedés esetén állandósul az érték. Utóbbinál kis átfedések esetén néhol elég kevés adat állt rendelkezésre ezért azok pontatlanabb eredmények. Az ablak mérete mindenhol 1024-es.



7.1. ábra. Az átfedés változtatásának hatása.