HIDEGH GYÖNGYVÉR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK

HIDEGH GYÖNGYVÉR

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

Diffúzorok alkalmazásának hatása előkeveréses égők károsanyag kibocsátására

Témavezető:
Józsa Viktor
Tanársegéd

Budapest, 2016

Szerzői jog © Hidegh Gyöngyvér, 2016.
Szerzői jog © Józsa Viktor, 2016.

NYILATKOZATOK

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Hidegh Gyöngyvér* (D2OGB0), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírásommal igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és a TDK dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2016. október 26.

Hidegh Gyöngyvér

TARTALOMJEGYZÉK

Absztrakt ix
1. Célkitűzés 1
2. Bevezetés 3
3. Gázturbinák károsanyag kibocsátása 5
3.1. Szennyezőanyagok hatása 5
3.2. Keletkezési mechanizmusok 6
3.2.1. Szén-monoxid 6
3.2.1.1. A légfeleslegtényező hatása 7
3.2.1.2. A tűztérben uralkodó nyomás hatása 7
3.2.2. Nitrogén-oxidok 8
3.2.2.1. Termikus NO képződés 8
4. Alacsony károsanyag kibocsátású égőterek 11
4.1. Változtatható geometria 11
4.2. Tüzelés több fokozatban 11
4.3. Előkeveréses égőtér 12
4.4. RQL égőtér 13
4.5. Katalitikus égőtér 13
5. Fotospektroszkópia 15
5.1. Motiváció a lángok spektrumának vizsgálatára 15
5.2. Kemilumineszcencia 16
5.2.1. A kemilumineszcens emisszió észlelése 17
5.3. Intenzitásarányok alkalmazhatósága 18
6. Lángstabilitás 21
6.1. Lángstabilizálás csőszakaszban 23
6.2. Lángstabilizáló elemek 24
7. A mérőrendszer bemutatása 27
8. Korábbi eredmények bemutatása 31
8.1. Lángstabilitás 31
8.2. Kemilumineszcens emisszió 34
9. Eredmények és következtetések 37
9.1. CO 38
9.2. NO_x 40
9.3. A spektroszkópia és a károsanyag kibocsátás 42

10. Összefoglalás és továbblépési lehetőségek 47
11. Felhasznált források.....49

ABSZTRAKT

Napjainkban a károsanyag kibocsátás egyre nagyobb figyelmet kap, így törvények, rendeletek és szabványok korlátozzák a károsanyagok maximális koncentrációját a füstgázban, több kategóriát meghatározva a különböző típusú és teljesítményű berendezések szerint. A kibocsátási határértékek minden tüzeléstechnikai berendezésre évről-évre szigorodnak, ennek következtében ezen a területen tevékenykedő mérnökök folyamatosan újabb kihívásokkal szembesülnek a károsanyag kibocsátás csökkentését illetően. Erre egy lehetséges megoldás a szegény keverék alkalmazása, ugyanis a korábban alkalmazott diffúziós lángok túlzott mértékű károsanyag kibocsátással rendelkeztek. A keverék elszegényítése azonban stabilitási problémákat vet fel, mivel a legkisebb kibocsátás elérése érdekében minél közelebb szükséges üzemelni a lánglefúvási határhoz. Ebből kifolyólag a stabil égési tartomány szélesítése kiemelt jelentőségű, mivel ezzel még alacsonyabb kibocsátási értékek érhetők el.

A stabilitási határ szélesítésére egy lehetséges megoldás az égőszáj megtoldása diffúzoros kialakítású elemmel. Ennek hatására a fal mellett kialakul egy, az égés sebességénél kisebb sebességű határréteg áramlás, ami képes visszagyújtani a keveréket, és ezáltal szélesebb tartományban fenntartani az égést. Kutatásom során egy ilyen konstrukció hatását vizsgálom a károsanyag kibocsátás változására.

A stabilitási határhoz közel való üzemeltethetőség megvalósítása érdekében elengedhetetlen a megfelelő diagnosztikai eszközök alkalmazása ahhoz, hogy fenntartható maradjon az égés. Egy lehetséges lángdiagnosztikai eszköz a spektrofotométer, mellyel az égés során lejátszódó kémiai folyamatokban keletkező kemilumineszcens összetevők mérésével megállapítható a légfeleslegtényező, és ennek ismeretében módosíthatók az üzemi paraméterek egy megfelelően illesztett szabályzókör segítségével.

A lángstabilitás növelésére és a tüzelőanyag-levegő jobb keveredésére széles körben elterjedt a perdületes égők alkalmazása. A mérések során az égés fennállása szerint különböző tartományok voltak megfigyelhetők a lángalak alapján: dúsabb keverék esetén a láng egyenes, majd egy bistabil tartományba kerül át a keverék szegényítése során, míg végül újra stabilizálódik, és szétnyíló formát ölt, míg ki nem alszik. A legszegényebb, V alakú tartományban korábbi tapasztalatok alapján az NOx kibocsátás mértéke minimális, a CO kibocsátás mértéke maximális a megengedett

határértékekhez képest. A kibocsátások mérvadó értékelhetősége érdekében korrigálni kell azokat a Magyarországon jelenleg érvényben lévő rendelet szerint. Mivel a mérések egy, a tanszéki C-30-as gázturbina égőjével megegyező fúvókán lettek végezve 15 kW-os tüzelési teljesítmény mellett, a korrekció során a 140 kW-nál kisebb tüzelési teljesítményű gázturbinákra vonatkozó rendeletet vettük figyelembe (7/1999 (VII. 21.) KöM rendelet).

1. CÉLKITŰZÉS

Manapság a gázturbinák meghatározó szereppel bírnak a repülés terén, és kiemelkedő jelentőséggel az erőművi felhasználásban. Az égőterek továbbfejlesztése a tökéletesebb és így minél jobb hatásfokú égés felé, illetve az egyre szigorodó károsanyag kibocsátási határértékek betarthatósága felé irányul. A károsanyag kibocsátás részben tüzeléstechnikával kapcsolatos probléma, mely a környezetre és az emberi egészségre egyaránt hatással van. Következésképpen törvények, rendeletek és szabványok korlátozzák a károsanyagok maximális koncentrációját a füstgázban, több kategóriát meghatározva a különböző típusú és teljesítményű berendezések szerint. A károsanyag kibocsátás minimalizálására két lehetséges út ismert: az égőtérben való keletkezés csökkentése, vagy a füstgáz utókezelése, például katalitikus redukcióval.

Kutatásom során egy adott tüzelőanyag-porlasztó egy lehetséges módosításának hatását vizsgálom a károsanyag kibocsátásra, tehát a kialakított konstrukció alkalmazásával a kibocsátás csökkenését várom az eredeti konstrukció alkalmazásakor mérhető kibocsátáshoz képest. A vizsgált berendezés a tanszéki C-30-as gázturbina égője, az alkalmazott tüzelőanyag gázolaj volt. Korábbi kutatásaim során azonos alkotójú, de különböző nyílásszögű diffúzorok lángstabilizáló hatását vizsgáltam. A diffúzorok az említett égő szájára helyezve mintegy toldatként szolgálnak, az egyes konstrukciókat különböző porlasztónyomásokon és légfeleslegtényezőkkel vizsgáltam, azonos tüzelőanyag-tömegáram mellett. Kiemelkedő lángstabilitás növekedés volt tapasztalható a 30°-os és 15°-os félkúpszögű diffúzorok esetében, ennek értelmében ezen konstrukciók alkalmazása mellett vizsgáltam a károsanyag kibocsátásokat.

2. BEVEZETÉS

A 21. század legnagyobb kihívása a fenntarthatóság elérése. A problémák többsége a folyamatosan növekedő energiaszükséglet fedezésével kapcsolatos. Mivel manapság a felhasznált energia 80%-a fosszilis tüzelőanyagokon alapul, a tüzeléstechnikával foglalkozó mérnökök vállára egyre nagyobb súly nehezedik a tüzelés hatásosságának növelését és a károsanyag kibocsátás csökkentését illetően. Előre láthatóan, kiváltképp a közlekedésben, továbbra is a folyékony üzemanyagok lesznek dominánsak versenyképes alternatíva hiányában. Mivel napjainkban továbbra is a dízelolaj a legelterjedtebb folyékony üzemanyag a releváns tüzelőberendezések körében, az ezzel kapcsolatos kutatások eredményei azonnal gyakorlatba ültethetőek.

A tüzelési folyamatokból eredő károsanyag kibocsátás az utóbbi évtizedekben igen nagy figyelemre tett szert az egészségre és a környezetre gyakorolt káros hatásának köszönhetően. A múlt század gyors változásokról tanúskodik mind a gázturbinák károsanyag kibocsátásával kapcsolatos szabályozások terén, mind pedig a azok betartásához szükséges technológiai újítások terén. Ezen időszak alatt a polgári repülés üzemanyag fogyasztása olyan mértékben megnövekedett, hogy manapság a világ leggyorsabban növekedő energia felhasználó szektoraként van számon tartva. Ezzel egyidőben az erőművi gázturbinák a gáz- és olajipar meghatározó hőerőgépei lettek, és egyre jobban elterjedtek például a kombinált ciklusú erőművekben. A fejlesztéseket az égőtérbeli nyomás folyamatos növelése kísérte a károsanyag kibocsátás csökkentése érdekében [1].

3. GÁZTURBINÁK KÁROSANYAG KIBOCSÁTÁSA

A gázturbina által kibocsátott füstgázban a következő összetevők jelenhetnek meg:

- szén-monoxid (CO),
- szén-dioxid (CO_2),
- vízgőz (H_2O),
- elégetlen szénhidrogének (UHC),
- szilárd részecskék (főleg szén),
- nitrogén-oxidok (NO_X),
- kén-oxidok (SO_X),
- többlet atmoszférikus oxigén és nitrogén.

A CO_2-ot és a H_2O-t többnyire nem tekintik károsanyagnak, mivel a szénhidrogének tökéletes eltüzeléséből adódó végtermékek, és nincs közvetlen, lokális káros hatásuk. A tökéletes égés másik terméke, a vízgőz semmilyen értelemben nem nevezhető szennyezőanyagnak, mivel egyrészt semmilyen káros hatása nincs, másrészt olyan nagymértékben változó részarányú komponense a természetes levegőnek, hogy a kibocsátása nem hozhat létre a természetestől lényegesen különböző koncentrációkat. A CO_2 azonban hozzájárul a globális klímaváltozáshoz, és kibocsátása csak kevesebb tüzelőanyag felhasználással csökkenthető. Tehát egy hőerőgép termikus hatásfokának javítása nem merül ki az üzemeltetési költségek csökkentésében, a károsanyag kibocsátás csökkentése is hasonló jelentőséggel bír.

3.1. Szennyezőanyagok hatása

A CO belélegezve csökkenti a vér oxigén abszorbeáló képességét, és magas koncentráció esetén akár halált okozhat. Az UHC-k NO_X-okkal egyesülve fotokémiai szmogot hoznak létre. A szilárd részecskék láthatósági problémákat okoznak és szennyezik az atmoszférát. Ezek alapvetően elenyésző mértékben kerülnek a légkörbe ahhoz, hogy mérgezőnek legyenek minősítve, viszont fellelhetők olyan kutatási eredmények [2], melyek szerint szoros összefüggés mutatható ki az asztma és egyéb légúti megbetegedések, és a mikrogramos tartományban kibocsátott atmoszférikus szennyezőanyagok koncentrációja között. Ezen felül néhány részecske tartalmazhat

nehézfémeket, például báriumot, ami egy újabb szennyező anyag a füstgázban. A NO_X vegyületekből keletkező nitrátok (pl. peroxi-acetil-nitrát – PAN) élettartama hosszú, részecskéi szét tudnak terjedni az atmoszférában és így a környezetre gyakorolt hatásuk nem csak regionális, hanem globális is [3]. A NO_X kibocsátás hozzájárul a fotokémiai szmog keletkezéséhez, a sztratoszférikus ózon bontásához, az üvegházhatáshoz, illetve károsítja a növényzetet és elősegíti a savas esők kialakulását. A fűtőolajjal üzemelő erőművi gázturbinákban SO_X (ami főként kén-dioxidból (SO_2) és kén-trioxidból (SO_3) áll) is keletkezhet, ha a tüzelőanyagban található kén reakcióba lép az égéslevegő oxigénjével. Ezek mérgező és korrozív anyagok, melyek kénessav képződéséhez vezethetnek a légkörben. Mivel gyakorlatilag a tüzelőanyag összes kéntartalma SO_X-dá oxidálódik a tüzelés során, a lehetséges eljárások a csökkentésre a kéntartalom eltávolítása az üzemanyagból a tüzelés előtt, vagy leválasztása a füstgázból.

3.2. Keletkezési mechanizmusok

Jelen dolgozatomban egy adott égő CO és NO_X kibocsátásával foglalkozom, így a következőkben ezen komponensek keletkezése kerül bemutatásra.

3.2.1. SZÉN-MONOXID

Amikor tüzelőanyagban gazdag, tökéletlen égés játszódik le, akkor nincs elég oxigén ahhoz, hogy a reakció végtermékeként CO_2 keletkezhessen, ezért nagy mennyiségű CO kibocsátás jön létre. Azonban ha a tűztérben lévő keverék sztöchiometrikus vagy kissé tüzelőanyagban szegény, akkor is jelentős mennyiségű CO keletkezik a CO_2 disszociációja révén. A gyakorlatban a CO kibocsátás jóval nagyobb mértékű, mint ahogy azt az egyensúlyi számítások mutatják, és alacsony teljesítményigény esetén a relatív alacsony hőmérséklet csúcsok miatt értéke maximális. Ez ellentmondásban van az egyensúlyi elmélettel, és azt feltételezi, hogy a legtöbb CO a nem tökéletes tüzelésből keletkezik, és a következő mechanizmusok közül valamelyik az okozója:

- ha a tüzelőanyag/levegő arány nagyon alacsony és/vagy nem elegendő a tartózkodási idő, akkor a primer zónában nem lesznek megfelelők a tüzelési paraméterek;

- a tüzelőanyag és a levegő nem megfelelő keveredése olyan régiókat hoz létre, ahol a keverék túl szegény, hogy fennmaradhasson az égés, és ahol a túl dús keverék égése magas helyi CO koncentrációt okoz.

Lépcsőzetes levegőbevezetéssel a füstgáz hőmérséklete fokozatosan csökken, és ezzel elméletileg lehetséges az elsődleges tüzelés során keletkezett CO nagymértékű csökkentése, azonban a keletkezett CO relatív ellenálló az oxidációval szemben. Magas hőmérsékleteken a fő reakció a CO eltávolítására:

$$CO + OH = CO_2 + H.$$

Ez egy széles hőmérséklet tartományon lejátszódó gyors reakció. Alacsonyabb hőmérsékleten a következő reakció játszódik le:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2.$$

A főbb tényezők, melyek befolyásolják a tüzelés hatásfokát és ezáltal a CO kibocsátást:

- tüzelőtér belépő hőmérséklet,
- tüzelőtérben uralkodó nyomás,
- primer zónában a légfeleslegtényező.

3.2.1.1. A légfeleslegtényező hatása

Több megfigyelés szerint [1][4] a légfelesleg növelésével a CO kibocsátás csökken, és minimum értéket vesz föl λ=1,25 körül, majd a légfelesleg további növelése a CO kibocsátás növekedését eredményezi. Nagy légfelesleg esetén a tüzelés hőmérséklete alacsony, ami miatt nehezen jön létre oxidáció, így a CO kibocsátás magas lesz. A légfelesleg csökkentésével emelkedik a lánghőmérséklet, ami felgyorsítja az oxidációs folyamatokat, ezért csökken a CO kibocsátás. Emellett az 1800 K-nél magasabb hőmérsékleteken a CO_2 kémiai disszociációja révén számottevő mennyiségű CO keletkezhet. Ebből következően csak a λ=1,25 légfeleslegtényező érték szűk környezetében érhető el alacsony CO kibocsátás.

3.2.1.2. A tűztérben uralkodó nyomás hatása

A tűztérben uralkodó nyomás növelése jótékonyan hat a CO kibocsátás csökkentésére. Ipari tüzelőterek tesztelése során kimutatták [1], hogy magas légfelesleg esetén a nyomás 50%-os növelése a CO kibocsátást két nagyságrenddel csökkenti, alacsony légfelesleg esetén pedig ugyan akkora nyomás növeléssel a kémiai disszociáció elfojtása révén gyakorlatilag kiküszöbölhető a CO kibocsátás.

3.2.2. NITROGÉN-OXIDOK

A tüzelés során keletkező NO többsége később igen gyorsan NO_2-dá oxidálódik az atmoszférában. Ennek következtében a keletkező NO-ot és NO_2-ot környezetvédelmi szempontból összegezve szokás figyelembe venni (NO_X). Ez a következő mechanizmusok során jöhet létre:

- termikus NO képződés,
- prompt NO képződés,
- tüzelőanyagban kötött nitrogénből keletkező NO,
- N_2O-on keresztül keletkező,
- NNH-on keresztül keletkező.

Bizonyos körülmények között a NO már a láng elején megtalálható, azaz a reakció már a gyulladás pillanatában lejátszódik, így a láng elején ugrásszerűen megnő a NO koncentrációja. Tehát a prompt NO képződéshez tüzelőanyag-felesleg szükséges, illetve nagymértékű hőmérséklet-változás kis térfogatban.

3.2.2.1. Termikus NO képződés

A láng magas hőmérsékletű régióiban keletkezik az atmoszférikus nitrogén oxidációjával. A folyamat endoterm, és jelentős mértékű NO csak 1850 K körüli hőmérséklet fölött keletkezik. A folyamat lejátszódásához hosszú tartózkodási idő és magas oxigén koncentráció szükséges. A kritériumok miatt a mechanizmus ott játszódik le, ahol az égés már lezajlott, de a hőmérséklet még mindig magas és felesleges oxigén is van, valamint a tartózkodási idő ebben a zónában elegendő. Ez a tűzterek lángok feletti régióit jelenti, ahol a lépcsőzetes levegő bevezetés miatt az oxigén koncentráció magasabb. A tartózkodási ideje a füstgáznak kicsi ebben a zónában, ezért ez erősen korlátozza a keletkezendő NO mennyiségét. Kikerülve ebből a zónából a hőmérséklet túl alacsony és a reakciók befagynak [3]. A reakciók az alábbi egyenletek szerint játszódnak le:

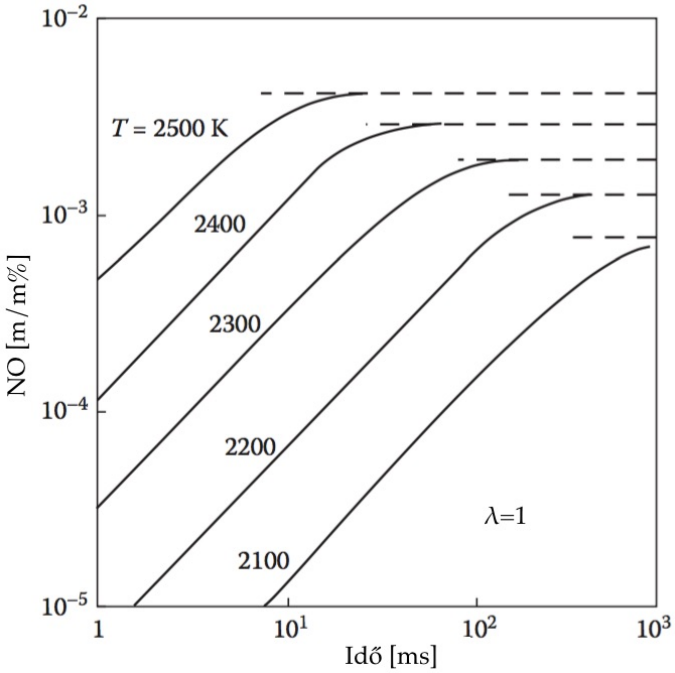
$$N_2 + O = NO + N$$

$$N + O_2 = NO + O$$

$$N + OH = NO + H$$

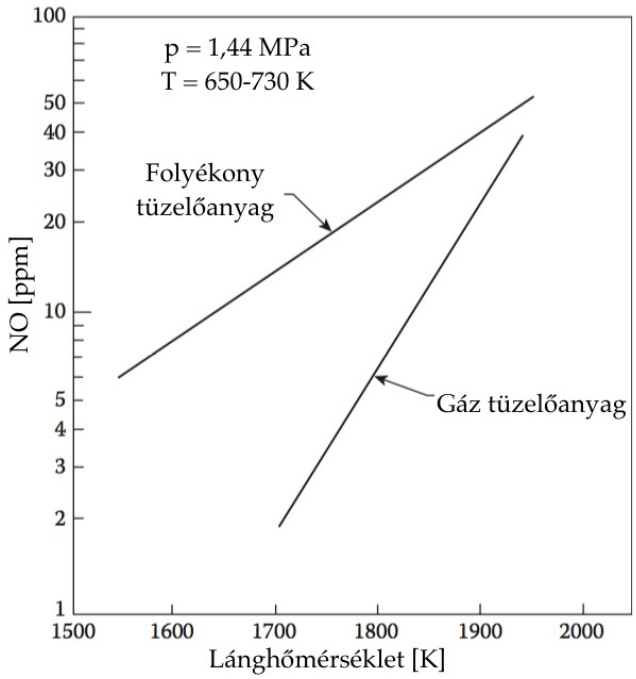
Látható, hogy a reakciók elindításához atomi oxigén szükséges, amely a magas hőmérséklet következtében az O_2 molekula termikus disszociációja révén képződik. Az oxigén molekula bomlása már 1300 K-nél elkezdődik, de gyakorlatilag csak 1700 K-től jelentős mértékű.

Az NO keletkezés maximuma a sztöchiometrikus állapot tüzelőanyagban szegény oldalán található. Ez a tüzelőanyagnak és a nitrogénnek az elérhető oxigénért folyó „versengéseként” értelmezhető. Habár a tüzelés hőmérséklete magasabb a sztöchiometrikus állapot tüzelőanyagban gazdagabb oldalán, ott a még jelenlévő oxigént többnyire a tüzelőanyag használja föl. A termikus NO keletkezésének exponenciális függése a lánghőmérséklettől a *3.1 ábrán* tekinthető meg. Az NO keletkezés a hőmérséklet csökkenésével rohamosan mérséklődik, kiváltképp az átlagos tűztéri tartózkodási idő (5 ms) körül.



3.1 ábra. A termikus NO keletkezésének hőmérséklet függése [1].

A *3.2 ábra* a termikus NO lánghőmérséklettől való exponenciális függését mutatja gáz és folyadék halmazállapotú tüzelőanyag esetén [5]. E szerint a folyékony és gáz halmazállapotú tüzelőanyagok közti különbség a NO kibocsátásban egyre jobban csökken a lánghőmérséklet növekedésével, és elhanyagolhatóan kicsi lesz a legmagasabb hőmérséklet értékeknél. A jelenségre a magyarázat, hogy a folyékony tüzelőanyagok égésekor mindig adott a lehetőség a sztöchiometrikushoz közeli lánghőmérséklet kialakulására a tüzelőanyag cseppek lokális környezetében, és ezáltal magas lehet a NO kibocsátás, mégha az égőtérbeli átlagos légfeleslegtényező jelentősen kisebb is a sztöchiometrikusnál. A légfelesleg csökkenésével a lánghőmérséklet megközelíti a sztöchiometrikus értéket, így a cseppek körüli környezetben keletkező NO kevésbé van hatással a teljes NO kibocsátásra. Ebben az állapotban azonos légfelesleg esetén a folyékony és gáz halmazállapotú tüzelőanyag NO kibocsátása közel azonos mértékű.



3.2 ábra. A termikus NO keletkezésének függése a tüzelőanyag halmazállapotától [1].

Összefoglalóan a termikus NO keletkezésére a következők vannak hatással:

- Képződése nagy mértékben függ a lánghőmérséklettől;
- Kevés NO képződik 1850 K-nél alacsonyabb hőmérsékleten is;
- A hagyományos gázturbinák égőterében uralkodó tipikus körülmények között (néhány ms-ig tartó magas hőmérséklet) a NO mennyisége lineárisan nő az idő függvényében, viszont az egyensúlyi értékét nem éri el;
- A nagyon szegény keverékkel üzemelő (λ>2) tüzelőterekben az NO keletkezése többnyire független a tartózkodási időtől.

Belátható, hogy a károsanyag kibocsátás főbb összetevői, mint a NO_x és a CO meghatározó szerepet játszanak egy tüzelőberendezés üzemeltethetőségében. Ezek meghatározására egy triviális megoldás a füstgáz összetevők vizsgálata. Azonban, ha ezt megkerülve, más módszert is alkalmazhatunk az összetevők meghatározására, az egyrészt a költségcsökkentés lehetőségét, másrészt az egyszerűbb felépítés megvalósíthatóságát hordozza magában. Egy ilyen berendezéssel, a spektrofotométer alkalmazhatóságával foglalkozom többek között az *5.* és *9. fejezetben*.

4. ALACSONY KÁROSANYAG KIBOCSÁTÁSÚ ÉGŐTEREK

Tüzelőtér tervezéskor az alapvető kihívások a következők:

- keverék könnyű begyújthatósága,
- széles üzemi tartomány,
- magas tüzelési hatásfok,
- minimális károsanyag kibocsátás,

miközben adott befecskendezési helyről érkezik a tüzelőanyag a fix kialakítású égőtérbe. Mivel egyes követelmények ellentmondanak egymással, a végső eredmény elkerülhetetlenül valami féle kompromisszumokat igényel. Egy jó példa a konstrukciós ellentmondásra a károsanyag kibocsátás csökkentésére folyamatosan fennálló igény. A hagyományos égőterek esetében bármely módosítás, ami enyhíti a NO_X kibocsátást, az majdnem mindig a CO és UHC kibocsátás növekedését fogja eredményezni, és viszont.

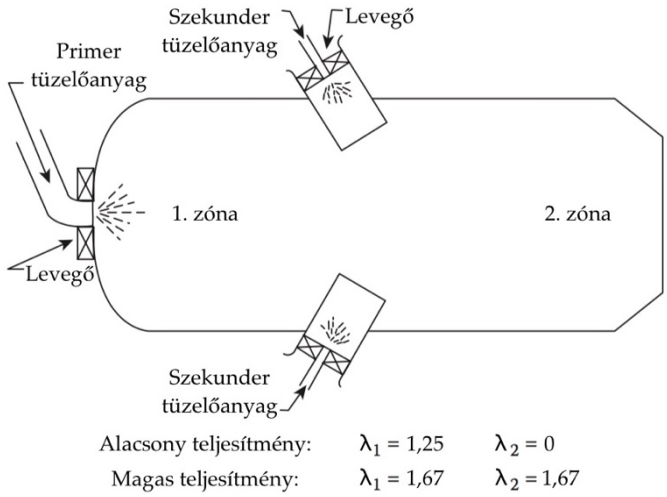
4.1. Változtatható geometria

Egy lehetséges megoldás a problémára a változtatható geometria alkalmazása, amely szabályozza a belépő levegő mennyiségét az elsődleges tüzelési zónában. Nagy nyomásokon a nagy mennyiségű levegő alkalmazható a korom és NO_X mennyiség minimalizálására. Kis nyomásokon az elsődleges levegő áramnak csak egy része jut a tűztérbe, ezáltal a tüzelőanyag/levegő arány növelésével és a sebesség csökkentésével magas tüzelési hatásfok, alacsony CO és UHC kibocsátás és jó gyújthatósági karakterisztika érhető el. Az állítható geometriát alkalmazták néhány nagy teljesítményű ipari gázturbinában, viszont a komplex vezérlésre és visszacsatoló mechanizmusokra való igény költség- és súly növekedéshez, illetve a megbízhatóság csökkenéséhez vezetett. Körvonalazódott, hogy kis teljesítményű gépek esetén és a repülésben ez a megoldás nem kellően biztonságos.

4.2. Tüzelés több fokozatban

Egy másik lehetőség a követelmények teljesítésére egy adott zónában a több fokozatban történő tüzelés. Ez állhat axiális vagy radiális fokozatelosztásból, ahol mindkét megoldás két különálló zónából épül fel úgy, hogy a zónák a tüzelési teljesítmény bizonyos szempontjainak optimalizálására vannak speciálisan megtervezve. Az axiális fokozatelosztás alapelve a *4.1 ábrán* látható. A magas tüzelési hatásfok és a CO és UHC keletkezésének minimalizálása érdekében a kevésbé terhelt

elsődleges zóna egészen alacsony légfeleslegtényezővel üzemel, λ=1,25 körül. Alacsony teljesítményigény esetén kizárólag az 1-es zóna biztosítja a szükséges hőmérséklet-növekedést. Magasabb teljesítményigény esetén mintegy pilot ágként funkcionál, és a 2-es zónában valósul meg a hőfelszabadítás nagy része. Mikor teljes terheléssel üzemel a berendezés, a légfeleslegtényező mindkét zónában magas (λ≈1,67) a NO_X kibocsátás minimalizálása érdekében.



4.1 ábra. Az égőtérbeli axiális fokozatelosztás [1].

A több fokozatban történő tüzelés radiális és axiális kialakítása is manapság széles körben elterjedt a gáz halmazállapotú tüzelőanyaggal üzemelő ipari gázturbinákban. Ezáltal alacsonyabb károsanyag kibocsátás érhető el anélkül, hogy víz- vagy gőz befecskendezéshez kellene folyamodni.

4.3. Előkeveréses égőtér

Folyékony tüzelőanyagok esetében a szegény keverékkel üzemelő előkeveréses (LPP) égőterek bizonyulnak a legkisebb NO_X kibocsátónak. A kialakítás lényege, hogy még a tüzelés előtt megtörténjen az üzemanyag teljes elgőzölögtetése, majd tökéletes keveredése a levegővel. A cseppek égésének elkerülésével és a reakció zóna szegény keverékkel való üzemeltetésével a tüzelőtérben nem alakulnak ki forró gócpontok és a lánghőmérséklet alacsony marad. Ennek köszönhetően a NO_X kibocsátás drasztikusan lecsökken, ahhoz képest, ha nem homogén keveréket juttatunk a tűztérbe. A legnagyobb hátránya az LPP rendszernek, hogy relatíve hosszú időre van szükség a teljes elpárolgáshoz és keveredéshez, ami alacsony terheltség esetén öngyulladáshoz vezethet, illetve a nagyobb teljesítményigény esetén kialakuló magas belépő nyomás és hőmérséklet miatt visszagyulladáshoz a tüzelőanyag előkészítő

csőben. Költség ráfordítással ezeken a problémákon túl lehet lendülni egy komplexebb égőtér konstrukció alkalmazásával, például többfokozatú tüzelés- és/vagy változtatható geometria kialakításával. Továbbá az LPP rendszerű égőtereknél kiemelt figyelemmel kell kezelni az élettartam, a karbantarthatóság és a biztonság kérdéskörét.

4.4. RQL égőtér

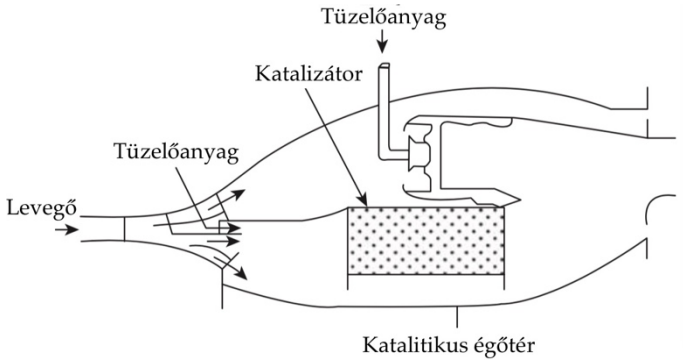
Egy másik fontos szereplő az alacsony NO_X kibocsátás terén az RQL (Rich-burn/Quick-quench/Lean-burn) égőtér. A tüzelőanyagban gazdag primer zónában az NO_X keletkezés mértéke alacsony az oxigén felélés és az alacsony hőmérséklet miatt. A primer zóna utáni részben további levegő bevezetésre van szükség a tüzelési folyamat befejezéséhez. A szekunder levegő bevezetését úgy kell kivitelezni, hogy az egyenletesen és gyorsan keveredjen a primer zónából érkező gázzal, máskülönben a hosszabb élettartamú forró gócokban jelentős mennyiségű NO_X keletkezhet. Tehát a forró gáz gyors és jó hatásfokú lehűtésére kialakított keverő rész megvalósítása meghatározó szereppel bír az RQL típusú égőterek területén.

4.5. Katalitikus égőtér

A katalitikus égőtér az a berendezés, amely a legnagyobb potenciállal rendelkezik a NO_X kibocsátás csökkentésében. Ebben a rendszerben az elpárologtatott és előkevert szegény homogén keverék egy katalitikus reaktor ágyon megy keresztül. A katalizátor jelenléte lehetővé teszi a tüzelést egészen magas légfelesleg mellett, ami normál körülmények között már a gyújthatóság határain kívül esne. Következtetés képpen, a hőmérséklet alacsony és az NO_X keletkezés minimális. Egyes konstrukciós megoldásoknál a termikus reakció zónája a katalitikus ágy után helyezkedik el. Ennek az a szerepe, hogy a gáz hőmérséklete a kívánt turbina belépő hőmérsékletre tud növekedni, illetve a CO és UHC koncentrációk elfogadható szintre csökkenthetők.

A katalitikus reaktorok potenciálja a nagyon alacsony károsanyag kibocsátásra már több tíz évvel ezelőtt ismert volt, viszont a gázturbina égőterekben uralkodó magas hőmérséklet és nyomás, és a széles üzemeltethetőségi tartomány követelménye jelentős akadályokat állít a működőképes katalitikus égőterek fejlesztésével szemben. A fő kihívás, hogy az alkalmazott katalitikus anyag hosszú élettartamú legyen.

A *4.2 ábrán* egy radiális fokozat beosztású kettős gyűrűs elrendezésű tüzelőtér vázlata látható. Az égőtér külső része kimondottan névleges teljesítményre van tervezve. Maximális terhelés esetén a reaktor biztosítja a hőmérséklet növekedés nagy részét a berendezés működtetéséhez.



4.2 ábra. A katalitikus égőtér felépítése[1].

5. FOTOSPEKTROSZKÓPIA

A gyertya lángjának spektrumát először Swan vizsgálta 1857-ben, az 1860-as években pedig Bunsen és Kirchoff folytatott spektrális megfigyeléseket a lángok fémtartalmának kimutatása érdekében [1]. Az egyik első alkalmazása a lángok tanulmányozásának minőségbeli analízis volt, valójában néhány elemet fedeztek föl először a láng spektrumában mutatott karakterisztikájuk alapján, mint például a rubídiumot Bunsen és Kirchoff 1861-ben. A mennyiségi analízis alkalmazása manapság gyakori és fontos az iparban és a kutatásban egyaránt. A kialakult lángban egy elem spektruma viszonylag egyszerű, általában csak néhány rezonancia-vonalból áll, ennélfogva az elemek azonosítása jóval egyszerűbb, mint egy elektromos ív vagy szikra esetében [6]. A lángok spektrumának feltérképezése azóta is egyre növekvő ütemben folyik, és ezekből a tanulmányokból szerzett tudás napjainkban is jelentős előrelépést eredményez az égés során lejátszódó folyamatok megértéséhez.

5.1. Motiváció a lángok spektrumának vizsgálatára

A láng által kibocsátott fény minőségének és mennyiségének feltérképezése fontos részét képezi a tüzelési folyamatok megismerésének. A láng minőségének, azaz a spektrumnak az elemzése, az egyszerű lángokat illetően, az első spektroszkópos vizsgálatok között volt. Minden lángnak megvan a saját karakterisztikája a spektrumban [1]:

- az égő szén-monoxid kék lángja a zöld színtől az ultraibolyáig tartó tartományban többnyire folytonos spektrumot mutat, amire számtalan, önmagában alig észrevehető sáv szuperponálódik;
- a hidrogént tartalmazó lángok kevéssé fényesek a látható hullámhossz tartományban, viszont az ultraibolya tartományhoz közel egy sávban, szembetűnően körülbelül 306 nm-nél erős kemilumineszcens emisszió tapasztalható;
- a Bunsen-típusú szénhidrogén lángok zöld-kék belső kúppal rendelkeznek, mely a spektrumban a zöld, kék és ibolya tartományokban van jelen;
- a hideg éter lángok kék színűek és viszonylag egyszerű csoportot képeznek a kék és ibolya tartományokban.

A tüzelőanyag-levegő arány függvényében is meghatározhatók a jellemző színképek: a tüzelőanyagban gazdag szénhidrogén lángok a zöld szín tartományában erősebbek, illetve a koromképződés okán létrejövő feketetest sugárzás miatt sárga színűnek láthatók, míg a szegény keverékek színképe az ibolya tartományban kimagaslóbb. Így a lángok tisztán empirikus vizsgálata alapján felismerhetők a különböző tüzelőanyagok és tüzelési paraméterek. Például a gázturbinák tüzelőterében a láng általában az égő szén-monoxid karakterisztikáját mutatja a spektrumban, viszont ha az égés nem tökéletes, megtalálható lehet a spektrumban az égő szénhidrogének karakterisztikája is, míg bizonyos esetben a tüzelőanyag utólagos befecskendezése a hideg lángokéhoz hasonló spektrumot mutat [6].

Az előkevert lángok kemilumineszcenciája széleskörben használt különböző tüzeléstechnikai alkalmazásokban, mivel természetes módon jelen van a lángban, azaz nincs szükség külső megvilágításra, gerjesztésre [7]. Bár az ilyen tapasztalati megfigyelések sok esetben jól alkalmazhatóak, mégsem várható el, hogy információt adjanak a tüzelés közben lejátszódó elemi folyamatokról. Egyik fő célja a spektrum elemzésének az, hogy azonosíthatók legyenek a reakcióban résztvevő közbenső kémiai anyagok. A spektroszkópia egy másik sajátos előnye, hogy az intenzitáscsúcsok relatív erősségeinek összehasonlításával következtethetünk az közbenső elemek által kibocsátott energia eloszlására, és ebből az információból megállapítható lehet a lejátszódó kémiai folyamat és az egyes elemek képződésének módja.

5.2. Kemilumineszcencia

Egyes kémiai reakciókban gerjesztett részecskék jönnek létre, melyek egy része, az egyensúlyi állapotukba kerülésük során, fotont bocsát ki, ez a kemilumineszcencia. A gerjesztés során az elektron egy vagy több pályával feljebb kerül, mint ahol stabil. Amikor visszaugrik a stabil állapotba, akkor az alacsonyabb és a magasabb energiaállapot közti különbséget a fotonban érjük nyomon. Minél nagyobb energiaveszteséggel jár számára ez az ugrás, annál kisebb a foton hullámhossza. A jelenség az ultraibolya tartománytól az infravörös tartományig figyelhető meg, és a reakciólépcsők az alábbiak [8]:

1. két kiinduló részecskéből gerjesztett részecske jön létre: $A + B \rightarrow R^* +$ *egyéb*, ahol R a „radical” kifejezésre utal, azaz gyök, tehát nem stabil állapotú anyag. A gerjesztett állapot miatt annak fizikai tulajdonságai (például a fajhője és a viszkozitása) megváltoznak;

2. a gerjesztett részecske spontán vagy ütközés során leadja az energiatöbbletét egy foton kibocsátásával, a stabil állapota elérésének érdekében: $R^* + (M) \rightarrow R + (M) + h\nu$, ahol M egy tetszőleges anyag, lehet stabil molekula vagy gyök.

Az elektromágneses sugárzás hullámhossza az R gyöktől és az elektronátmenettől függ. Minden stabil részecske jellemezhető egy, vagy több emisszió görbével, melyek karakterisztikus csoportokba rendezhetők, így a különféle emittáló részecskék együttes jellemzői képezik a kemilumineszcencia színképét a lángokban. A kemilumineszcencia általi fő kibocsátók szénhidrogén lángokban az OH*, CH*, C_2* és CO_2*. A keletkezésüket leíró reakcióegyenletek és a hullámhossz maximumok az *5.1 táblázatban* láthatók.

Gyök	Reakciók		Hullámhossz [nm]
OH*	R1:	$CH + O_2 \rightarrow CO + OH^*$	282.9, 308.9
	R2:	$H + O + M \rightarrow OH^* + M$	
	R3:	$OH + OH + H \rightarrow OH^* + H_2O$	
CH*	R4:	$C_2H + O_2 \rightarrow CO_2 + CH^*$	387.1, 431.4
	R5:	$C_2H + O \rightarrow CO + CH^*$	
C_2*	R6:	$CH_2 + C \rightarrow C_2^* + H_2$	513, 516.5
CO_2*	R7:	$CO + O + M \rightarrow CO_2^* + M$	350-600

5.1 táblázat. A gerjesztett részecskék reakcióegyenletei és hullámhossz maximumai [9].

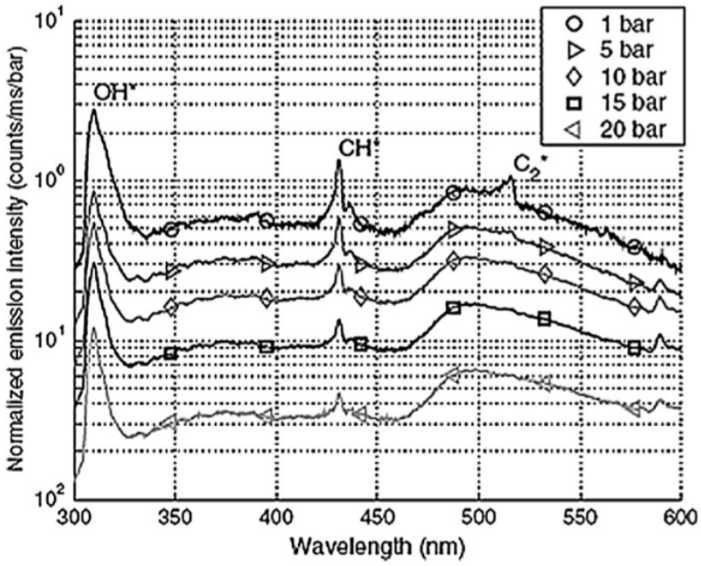
5.2.1. A KEMILUMINESZCENS EMISSZIÓ ÉSZLELÉSE

Az OH* gyökök ultraibolya sugárzást bocsátanak ki, főleg szénhidrogén lángokban keletkeznek (*R1*) és ritkábban hidrogén alapú lángokban (*R2* és *R3*). A CH* és C_2* gyökök színképe rendre kék és zöld. A CO_2* gyökök folytonos spektrummal jellemezhetők, a háttérsugárzásért nagy mértékben felelősek és a 350-600 nm hullámhossztartományban figyelhetők meg.

Az emissziós spektrumot számos változó befolyásolja, úgy mint a légfelesleg, a turbulencia, a tüzelőanyag tulajdonságai, vagy a nyomás. A légfelesleg hatását több tanulmányban is vizsgálták, melyekben a fő motiváció a láng-sztöchiometria optikai jelekből való megbecslése volt [8][9][10][11]. Bizonyos határig a tüzelőanyagban egyre szegényebb lángokban egyre magasabb az OH*, CH*, C_2* és CO_2* gyökök intenzitása. A szegény koncentrációhatárt közelítve a lánghőmérséklet nagymértékben csökken, és így az intenzitástól is ez várható. Az OH* és CH* gyökök kibocsátásának csúcsát

0,91 < λ < 1-nél találták, a C_2*-nek köszönhető maximális emissziót 0,83 < λ < 0,91-nél figyelték meg, bár ez a kibocsátás erősen függ a kísérlet körülményeitől: kisebb nyomáson és csökkenő légfeleslegnél tovább növekszik [9].

A nyomás szintén erősen befolyásolja az emissziós spektrum alakját. Figyelemre méltó a CH* és C_2* gyököknek köszönhető csúcsok csökkenő jelentősége. Ez a hatás a gyakorlatban igen fontos, mivel így a nagy nyomás alatt üzemelő égőterekben az emissziós csúcsok diagnosztikára való használata mindig körülményesebb. Ez a jelenség jól megfigyelhető az *5.1 ábrán*. Az intenzitás logaritmikus skálán való ábrázolása mellett is már jól látszik, hogy a nyomás növekedésével a CH* és C_2* csúcsok egyre kevésbé láthatók a spektrumban, azonban az OH* továbbra is jól azonosítható marad.



5.1 ábra. Metán láng spektruma λ=1 légfeleslegtényező értéknél [9].

A különböző összetételű lángok spektruma lényegesen eltérő, például ha adott mennyiségű tisztán földgáz tüzelőanyaghoz egyre több hidrogént keverünk, a CH* és C_2* csúcsok egyre jelentéktelenebbek lesznek. Szénhidrogén mentes lángokban, úgy mint tiszta hidrogén, vagy szintézis gáz lángokban, melyek fő összetevői a hidrogén és a szénmonoxid, ezek az intenzitáscsúcsok már nem láthatóak.

5.3. Intenzitásarányok alkalmazhatósága

A láng kemilumineszcens emissziójának megfigyelése széles körben elterjedt technológia a lángdiagnosztikában [8][10][11]. Főként az OH* és CH* gyökök kemilumineszcenciája, amit gyakran használnak az adott láng hőkibocsátásának

mérésére. A tökéletesen előkevert lángok átfogó vizsgálatával már többen kimutatták, hogy az OH* és CH* gyökök kemilumineszcens intenzitása arányos a tüzelőanyag - levegő keverék tömegáramával, a légfeleslegtényezővel pedig exponenciális kapcsolatot mutat az *5.1 képlet* szerint [11]:

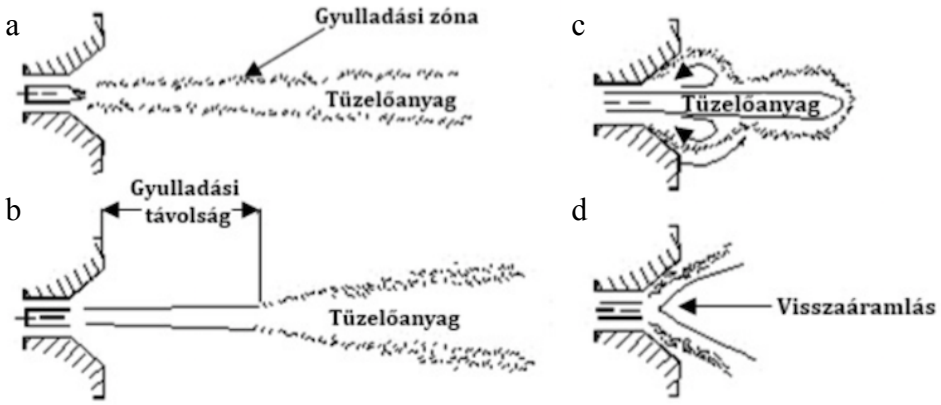
$$I = k \cdot \dot{m} \cdot \lambda^{-\beta}, \tag{5.1}$$

ahol k és β a kémiai összetevőre vonatkozó konstansok, λ a légfeleslegtényező valamint m a tömegáram. Így az említett két gyök intenzitásarányát véve, mivel ugyanazon tüzelőanyagban fellépő intenzitásokat hasonlítunk össze, a kémiai összetevőre vonatkozó konstansok kiesnek. Ez azt jelenti, hogy az OH* és CH* gyökök intenzitásának aránya csak a légfeleslegtényező függvénye, azaz mérésükkel következtethetünk a légfeleslegre.

6. LÁNGSTABILITÁS

Az előkevert lamináris lángsebesség az a sebesség, amivel a láng áthatol a tüzelőanyag - levegő keveréken. Ez a keverék alapvető fizikai - kémiai tulajdonságától függ, ezt tehát az égő aerodinamikája nem befolyásolja. A gyakorlatban nagyon kevés égő produkál lamináris lángot, ezért az égő szájánál mért sebesség és a lamináris lángsebesség közötti kapcsolat közvetett. Ilyen áramlási körülmények között a lángfront nagyon vékony, körülbelül 1 mm vagy gyakran még vékonyabb, és a helyzete úgy változik, hogy a lángsebesség és az áramlási sebesség egyenlő marad, ha stabil a láng [12].

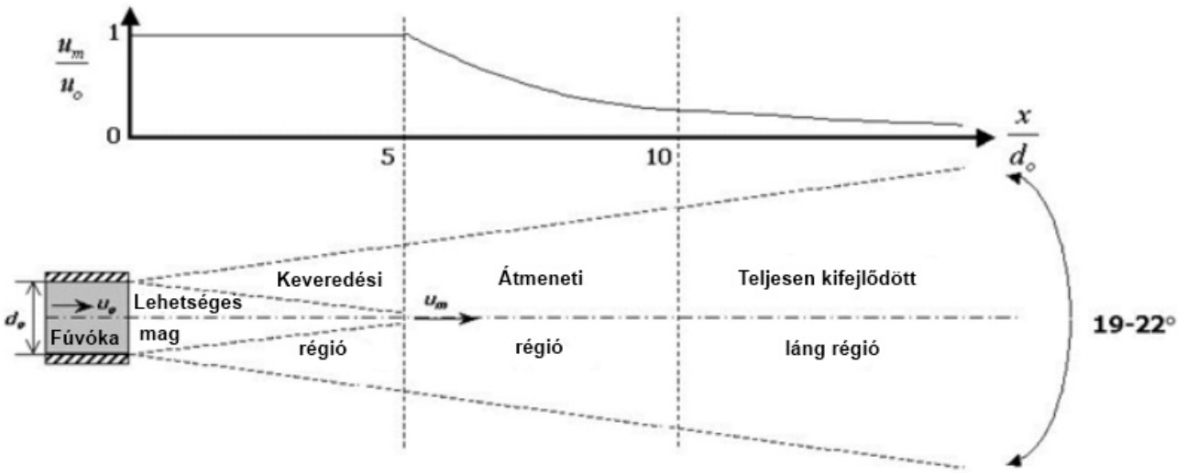
Turbulens áramlási viszonyok között a beérkező levegő sebessége jóval nagyobb, mint a lamináris lángsebesség. A turbulencia okozta örvények hatására a lamináris lángfront eltorzul, nagyobb felületet biztosítva a kémiai reakcióknak. Ez esetben az átlag áramlási sebesség jóval nagyobb is lehet a lamináris lángterjedési sebességnél, viszont a lángfront sebessége ennek ellenére egyensúlyt képes tartani vele. Belátható, hogy nagy égési sebesség mellett a stabil égési tartomány szélesítéséhez fenn kell tartani egy olyan területet a lángon belül, vagy hozzá csatlakozóan, ahol a tüzelőanyag - levegő keverék az éghetőség határain belül van, és ahol a közeg áramlási sebessége nem elég nagy ahhoz, hogy kioltsa a lángot. Ehhez szükség van valamilyen módon hő visszaáramoltatására, ami történhet például sugárzással, vagy a forró gáznemű égéstermékek recirkuláltatásával. Ezen elvek szerint a lángok csoportosíthatók a *6.1 ábra* mintája alapján.



6.1 ábra. Lángok csoportosítása [12].

Az *a)* láng az égőszájhoz kapcsolódik, perdület mentes, hosszú, és erősen világító stabil láng. A *b)* láng szintén perdület mentes, viszont a nagy áramlási sebesség már majdnem kioltja a lángot, tehát ez a láng nem stabil. A *c)* láng mérsékelt perdülettel rendelkezik, így itt megkezdődik az elsődleges recirkuláció, azaz az égés tengelyében visszaáramlik az égéstermék. Eleinte a keverékáram még elég erős ahhoz, hogy áttörjön ezen a recirkulációs zónán, így egy toroid alakú zóna alakul ki. Összességében a láng kiszélesül és lerövidül. Ez a láng széles recirkulációs tartományban stabil. A *d)* láng nagy perdülettel rendelkezik, az elsődleges recirkuláció legyőzi a keverékáramot és megosztja a lángot, így a középvonalban alakul ki a visszaáramlási zóna. Ez a lángtípus szélesebb stabilitási tartománnyal rendelkezik, mint a korábban bemutatottak.

Ha egy turbulens láng áramlik a szabad térbe, a *6.2 ábrán* látható jelenség játszódik le.



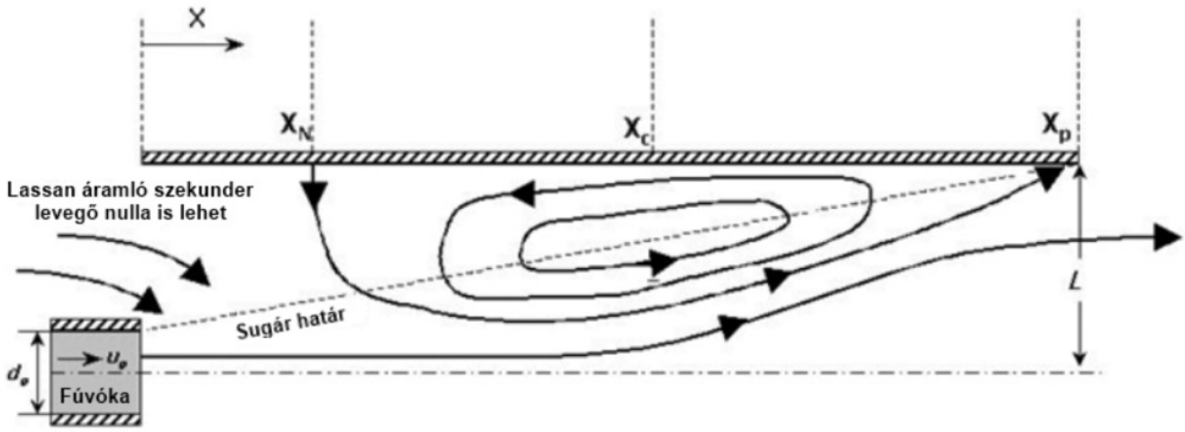
6.2 ábra. Szabadsugár áramlás [12].

A fúvóka d_0 átmérőjű kilépő keresztmetszetében a sebesség a határrétegtől eltekintve állandó, u_0 sebességű. A fúvókából kilépő levegő sugár kölcsönhatásba lép a közepén áramló tüzelőanyag sugárral, a kerülete mentén pedig érintkezik és kölcsönhatásba lép a környezetében lévő álló levegővel. Így a környező levegő egyre nagyobb részét mozdítja meg, ragadja magával, ami miatt a környező levegő fékező hatással lesz a sugárra. A sugár u_0 sebességgel jellemzett átmérője a távolsággal közel arányosan csökken és körülbelül $5d_0$ távolságban már csak a tengelyben egyezik meg a sebesség a kifúvási sebességgel. Eddig tart a szabadsugár kezdeti szakasza. Ezt egy lassuló szakasz követi, mivel itt az áramlási sebességek kisebbek az u_0 sebességnél és a sugár hossza mentén csökkennek. A sugárba bekeveredő környezeti levegő folyamatosan

áramlik a sugár irányába, közel merőlegesen a sugár tengelyére. A sugár határát azok a pontok határozzák meg, ahol a levegő sebességének tengely irányú komponense éppen különbözik zérustól. A tapasztalatok szerint ezek a pontok közelítően egy kúpfelületen helyezkednek el, melynek kúpszöge a 19-22° körüli érték a turbulencia fok függvényében [12]. A *6.2. ábra* diagramján a sugár egy adott keresztmetszetében mért u_m maximális sebesség és a kifúvási sebesség arányának változása látható a fúvóka átmérővel dimenziótlanított kifúvástól mért távolság függvényében. A kezdeti szakaszon a két sebesség megegyezik egymással, majd a dimenziótlan értékük hiperbola szerint csökken.

6.1. Lángstabilizálás csőszakaszban

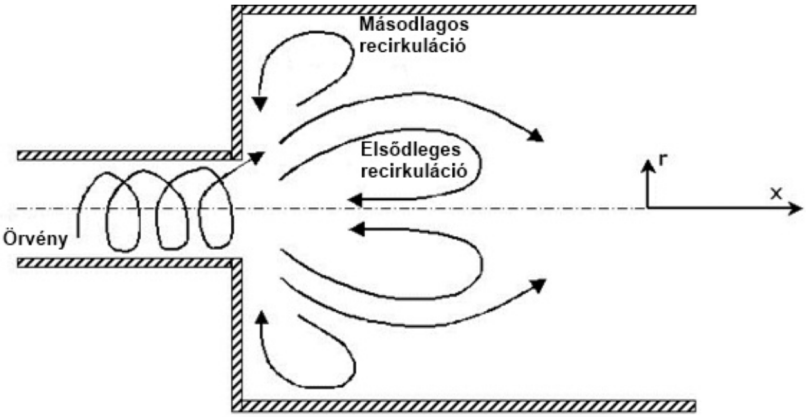
A gyakorlatban a csőfal fontos szerepet játszik a lángstabilizálásban, úgy viselkedik, mint egy hőnyelő, elfojtva ezzel a reakciót. Amikor az áramlási sebesség meghaladja a lángsebességet, a láng elkezd elemelkedni a cső végén, így a hőveszteség a csőfalon csökken, a lánghőmérséklet nő, ezért a lángsebesség is nő, és a láng új helyzetben stabilizálódik a cső nyitott szája irányában. Az áramlási sebesség további növelése lefújja a lángot. A fal a sugár túl gyors szétterjedését is akadályozza. A fal mentén az égési gázok visszaáramlanak az égéstérbe, ami kedvez a lángstabilitásnak, ez a másodlagos recirkuláció. A *6.3* és a *6.4 ábrán* megfigyelhető az elsődleges és másodlagos recirkuláció kialakulása. A *6.3 ábrán* a sugár szabad sugárként x_P távolságban ütközik a falnak, a recirkuláció középpontja x_C távolságban félúton helyezkedik el x_N (ahol a keveredés 0) és x_P távolság között.



6.3 ábra. Másodlagos recirkuláció zárt sugárban [12].

A *6.4 ábrán* a Borda-Carnot elemben történő recirkuláció látható. A később bemutatásra kerülő mérések során alkalmazott diffúzoros kialakítású égőszájra

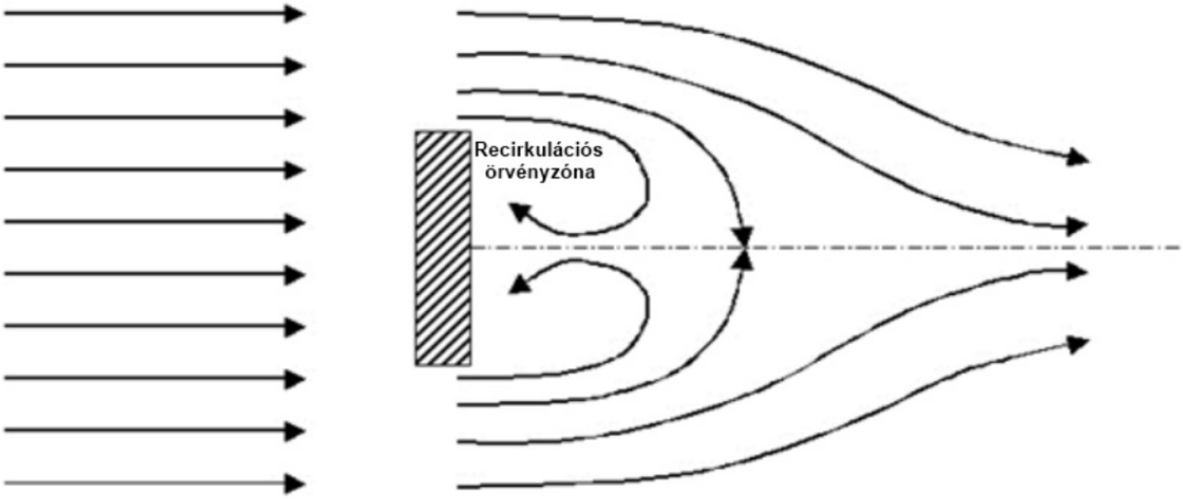
helyezett toldatok révén kialakuló viselkedése a lángnak ezen egyszerű példa alapján értelmezhető. Ha a másodlagos recirkuláció kialakulásához vezető hirtelen keresztmetszetváltozást eltérő kúpszögű felületekkel közelítjük, akkor a másodlagos recirkuláció ennek függvényében változhat, azaz lehet meghatározható szerepű vagy akár ki sem alakulhat. A későbbiekben bemutatásra kerül a különböző kúpszögű diffúzorok hatása, jelen dolgozatban elsősorban a károsanyag kibocsátásra gyakorolt hatásuk vonatkozásában.



6.4 ábra. Elsődleges és másodlagos recirkuláció kialakulása [12].

6.2. Lángstabilizáló elemek

Ha egy áramló közeg útjába torlasztó testet helyezünk, a közeg megkerüli azt, és mögötte alacsony nyomású tér lakul ki. Tehát a test mögött leválási buborék keletkezik, amiben létrejön egy recirkulációs zóna, melyet a *6.5 ábra* szemléltet.

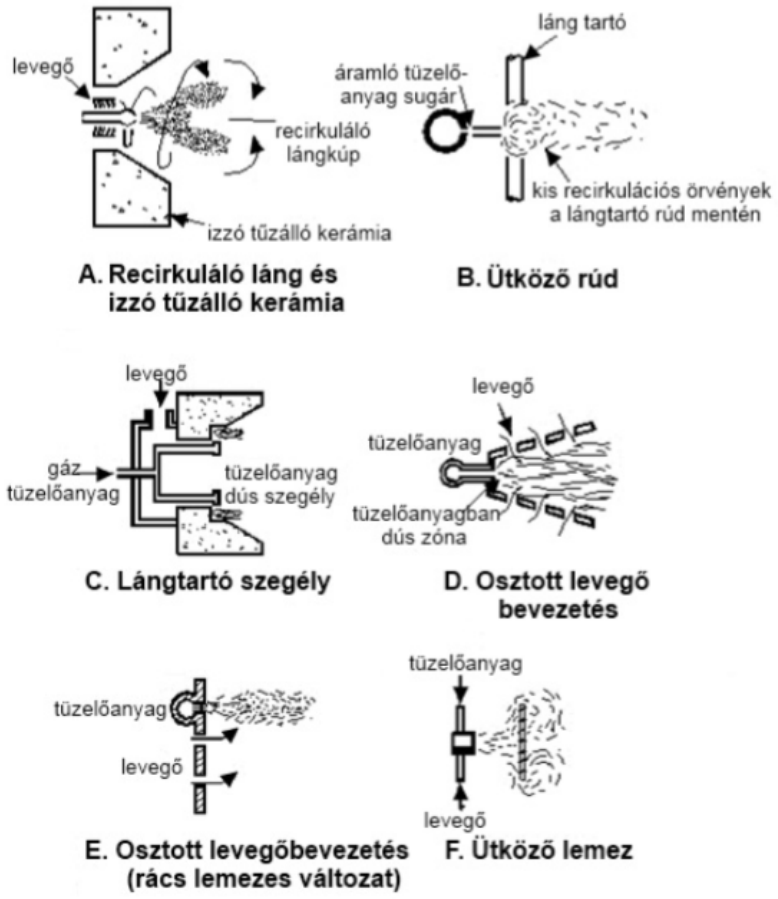


6.5 ábra. Torlóelem mögött kialakuló recirkuláció [12].

A lángstabilizálás égőkővel is lehetséges, ami például egy kúp alakú idom, mely körülveszi az égőszájat. Az égőkő a magas hőmérsékletű lángtól való felhevülést követően jelentő mennyiségű hőt lesz képes sugározni a keverékbe. A széttartó áramlású területen csökken a keverék sebessége, recirkulációs zóna jön létre a láng közepében, közvetlenül a fúvókával szemben, aminek köszönhetően a friss tüzelőanyag - levegő keverék kapcsolatba kerül a visszaáramló forró égéstermékkel.

Ha a láng nekiütközik egy csőnek vagy tárcsának, annak hatására tüzelőanyagban és levegőben gazdag örvények keletkeznek. Ezek egy része az áramba sodródik, ahol egyik része gyújtóforrásként szolgál, másik része pedig a torlóelem felszínén marad és újraképződik, amivel folyamatos szabályozást biztosít.

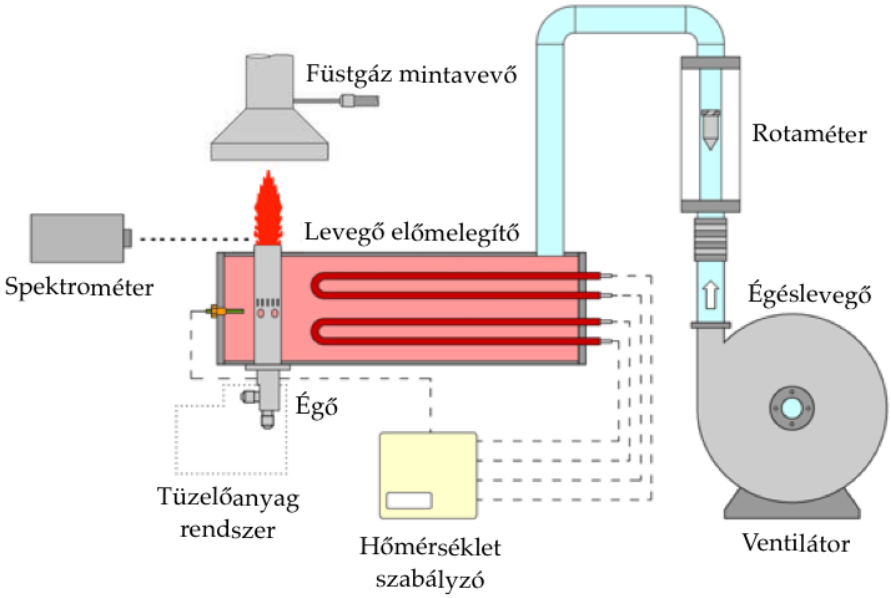
Ha diffúzort helyezünk az égőszájra, akkor a diffúzor felmelegszik, illetve a láng körül létrejön egy recirkulációs zóna. A megfelelő nyílásszögű diffúzor alkalmazásával ez a két jelenség széles tartományon stabilizálhatja a lángot, erre látható egy példa a *6.6.A ábrán*. Korábbi kutatásaink során azonos alkotójú, eltérő nyílásszögű diffúzorok hatását vizsgáltuk [13][14]. Mivel egyes elemek kiemelkedően jó karakterisztikát eredményeztek, érdemes ezeknek a károsanyag kibocsátásra gyakorolt hatásával is foglalkozom.



6.6. ábra. Lángstabilizálást segítő módszerek [12].

7. A MÉRŐRENDSZER BEMUTATÁSA

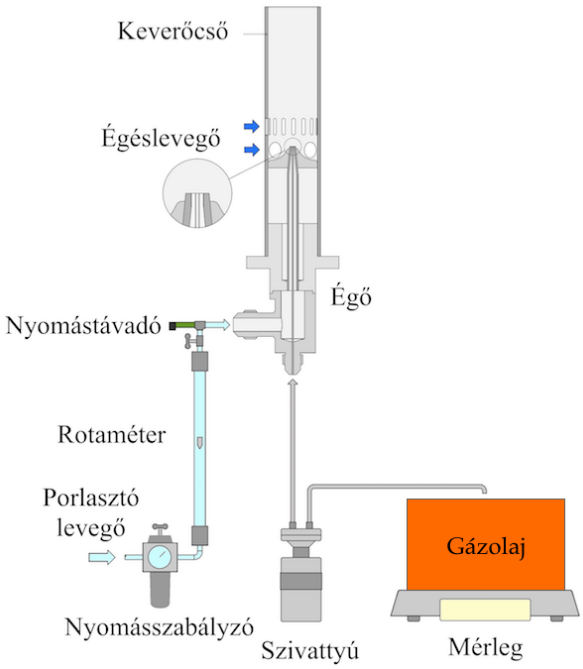
A *7.1 ábrán* látható tesztpad környezeti nyomáson üzemel, a magasabb üzemi nyomás helyett. Mivel az égés nyomásának növekedésével jellemzően a lángstabilitás is nő, a mért eredmények szűkebb stabilitási tartományt mutatnak, így a gázturbinás alkalmazás során biztos, hogy a megállapított üzemi tartomány jól alkalmazható lesz valós körülmények között is [1].



7.1 ábra. Égéslevegő rendszer [15].

A szükséges légmennyiség szállítására egy ventilátor szolgál, a szállított levegő térfogatárama egy rotaméterről olvasható le. A különböző térfogatáramok beállítását egy frekvenciaváltó teszi lehetővé. A levegő előmelegítése egy szabályozható előmelegítő segítségével valósul meg, amely 400°C-ra emeli a levegő hőmérsékletét mielőtt az belép az égőbe. A füstgázelszívóba az égőszáj fölött 1 méterre elhelyezett mintavételező cső vezeti a forró égésterméket a hordozható füstgázelemzőbe. A kibocsátási értékek leolvasását az *M.1 táblázatban* látható válaszidők miatt 1 percenként választottuk meg.

A mérőberendezés tüzelőanyag rendszer része a *7.2 ábrán* látható.



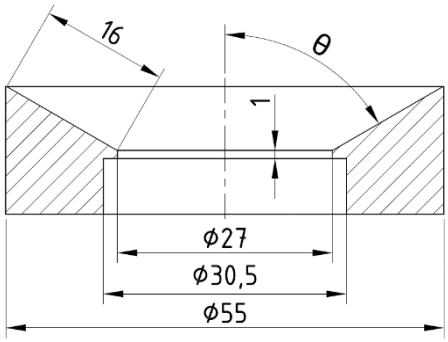
7.2 ábra: Tüzelőanyag rendszer [15].

Az alkalmazott fúvóka a C-30-as mikro-gázturbinában használttal megegyező, LPP rendszerű égő. A porlasztást egy egyszerű sugaras levegő segédközeges porlasztó valósítja meg, azaz a központi tüzelőanyag vezetékkel párhuzamosan, gyűrű keresztmetszetben lép ki a nagysebességű porlasztólevegő. A két közeg sebességkülönbsége vezet a folyadéksugár felbomlásához és a cseppek képződéséhez. A forró égéslevegő belépését négy tisztán radiális kör keresztmetszetű és tizenöt félig radiális - félig axiális téglalap formájú nyílás teszi lehetővé. Ezáltal a keverőcsőben perdületes áramlás alakul ki, ami miatt hosszabb lesz a részecskék pályája, ezzel jobb keveredés érhető el ebben a térrészben, tehát a tüzelőanyag homogénebb keveréket tud alkotni az égéslevegővel mire eléri a lángfrontot.

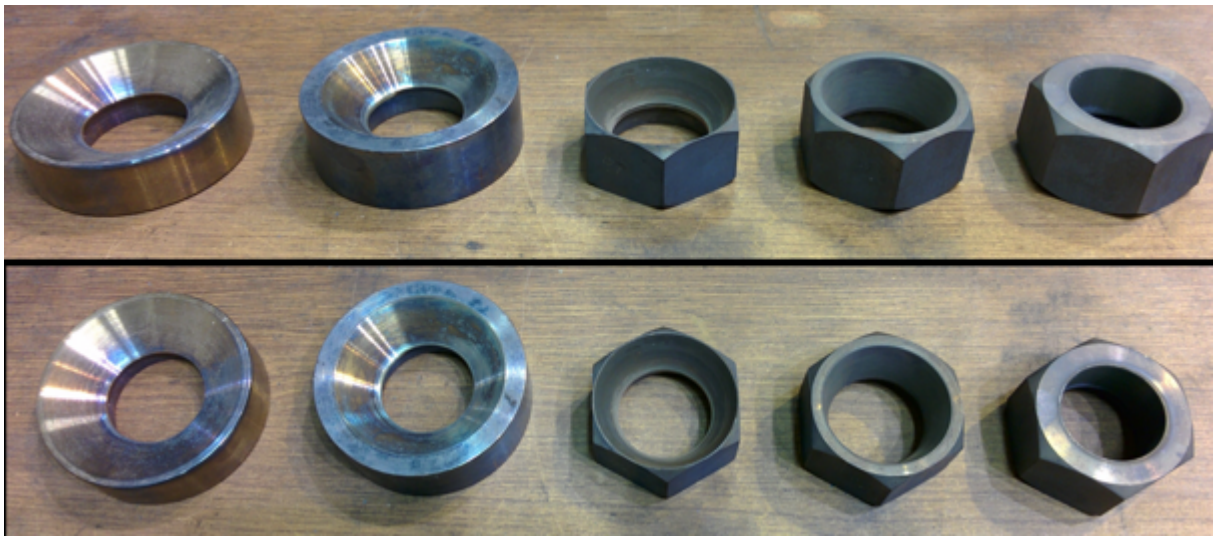
A folyékony tüzelőanyagot egy digitális mérlegre helyezett edényből egy feszültség vezérelt fogaskerékszivattyú juttatja az égőbe. Az üzemanyag aktuális súlyát egy számítógép rögzíti 30 s-onként A porlasztólevegő térfogatáramát szintén egy rotaméter méri, a kívánt porlasztónyomás pedig egy nyomáshatároló szelep biztosítja, és egy nyomástávadó méri.

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 *7.3 ábra* szemlélteti, a *7.4 ábrán* pedig megtekinthetők a felhasznált diffúzorok. Ezek alkotója minden esetben 16 mm

volt. Ezeket a 30 mm külső átmérőjű égő szájára illesztettük a megvezetés segítségével. Nyílásszög tekintetében a 0°–60°-ig terjedő sorozatot hasonlítottam össze az eredeti konfiguráció tulajdonságaival, 15°-os lépésközzel. A mérések a következőképpen zajlottak: adott tüzelőanyag tömegáram és fúvóka konstrukció mellett állandó porlasztónyomáson, egyenlő lépésközönként fokozatosan növeltük az égéslevegő mennyiségét 12 kg/h-tól a láng lefúvásáig. Korábbi mérési eredmények tapasztalatai alapján [16] a 0,3-2,2 bar porlasztási túlnyomás értékek közötti tartományt vizsgáltuk. Erre a későbbiekben egyszerűen porlasztónyomásként hivatkozom.



7.3 ábra. Az alkalmazott diffúzorok metszete.



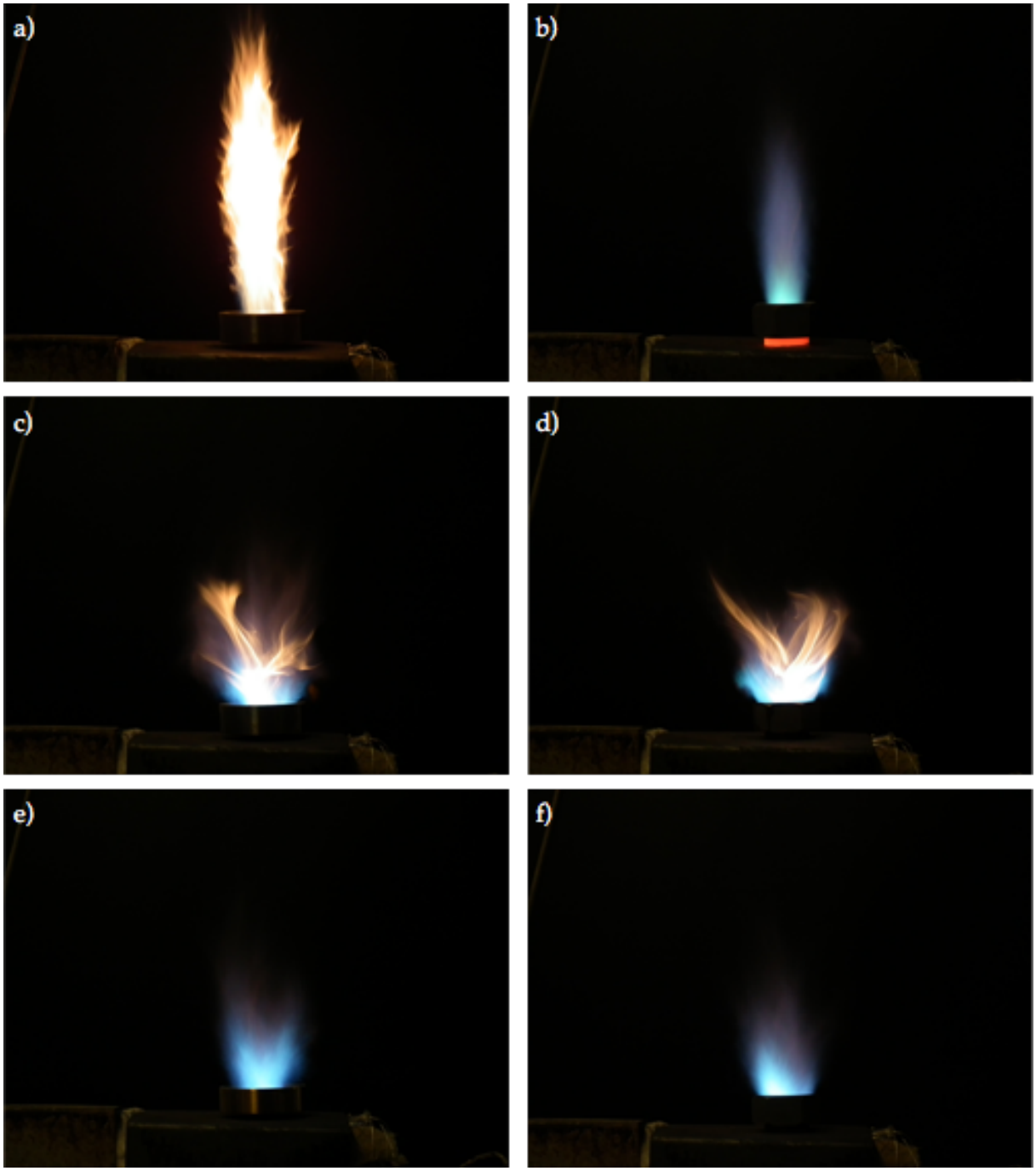
7.4 ábra. Az alkalmazott diffúzorok.

8. KORÁBBI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

8.1. Lángstabilitás

A tüzelés során a következő jellemzők figyelhetők meg: a láng kezdetben egyenes, majd bistabillá válik, szétnyílik, végül leszakad. A láng bistabillá válása alacsonyabb égéslevegő tömegáramnál következik be, mikor a láng egyre nagyobb perdülettel kezd rendelkezni, így az elsődleges recirkuláció elkezdi az erősen világító stabil lángot egy másik stabilitási tartományba átvinni. Az égéslevegő mennyiségének további növelésével, az elsődleges recirkuláció legyőzi a keverékáramot és megosztja a lángot, így a középvonalban kialakul a visszaáramlási zóna. Ez mindaddig fennmarad, míg elérjük azt az áramlási sebességet, amivel a lángterjedési sebesség már nem tud egyensúlyt tartani, ezért a láng kialszik.

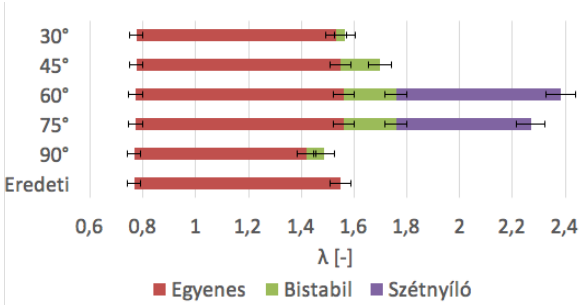
A tüzelés során létrejövő tipikus lángalakokat a *8.1 ábrán* tekinthetjük meg, a felvételek 1/100-as záridővel készültek. A *8.1.a)* és *b)* ábrákon egyenes lángalakok láthatók, rendre kis és nagy porlasztónyomás esetén. A lángok alakjából és színéből levonható a következtetés, hogy a kisebb porlasztónyomás esetén a koromképződés okán létrejövő feketetest-sugárzás miatt erősen világító, sárga lángot látunk. Nagy porlasztónyomáson (p_{porl}≃2,3 bar) a tökéletes párolgás, előkeverés és a nagy áramlási sebesség miatt a lánghossz lerövidül, a láng alakja jól meghatározható lesz, színképe pedig a kékes-lilás tartományban található. A *8.1c)* és *d) ábrákon* a bistabil lángalakra láthatunk egy-egy példát rendre kis és nagy porlasztónyomás esetén. Megfigyelhető, hogy kialakulóban van a szétnyíló lángalak, ez a külső kékes színű lángrész körülveszi a még fölfelé törekvő, az egyre erősödő recirkulációnak még engedni nem akaró, sárgás színű lángrészt. Látható, hogy ez már közel sem egységes, jól bemutatja a két stabil állapot közti változást. A *8.1e)* és *f) ábrákon* szétnyíló lángokat láthatunk szintén kis, illetve nagy porlasztónyomások esetén. A lángok itt újból jobbára szimmetrikusnak feltételezhetők. Jól látható a láng közepén kialakult visszaáramlási zóna és a lánghossz jelentős lerövidülése.



8.1 ábra. A tüzelés során megfigyelhető lángalakok: *a)* Egyenes láng (p_{porl}≃0,5 bar); *b)* Egyenes láng (p_{porl}≃2,3 bar); *c)* Bistabil lángalak (p_{porl}≃0,5 bar); *d)* Bistabil lángalak (p_{porl}≃1, 2 bar); *e)* Szétnyíló láng kis porlasztónyomáson (p_{porl}≃1,6 bar); *f)* Szétnyíló láng nagy porlasztónyomáson (p_{porl}≃2,3 bar).

Korábbi mérések során a diffúzorok alkalmazása az elvárásoknak megfelelően bizonyította, hogy ez egy jó módszer a lángstabilizálásra. A legstabilabb eredményeket a 15°-os és a 30°-os félkúpszögű elemek használatánál kaptuk, azaz volt hogy a 15°-os, volt hogy a 30°-os diffúzor esetében volt stabilabb a láng. Egy példaként a *8.2 ábrán* 1,6 bar porlasztónyomás alkalmazása mellett látható a stabilitási diagram. A diagram

függőleges tengelyén az adott égőszáj kialakítások olvashatók, a vízszintes tengelyen pedig a légfeleslegtényező található. A piros sáv tartozik az egyenes lángalakhoz, a zöld sáv a bistabil lánghoz, a lila sáv pedig a szétnyíló lángalakhoz. A bistabil láng alakja az egyenes és szétnyíló alak között váltakozott. A lángot a piros sáv indulásánál gyújtottuk be, és a lila sáv végénél aludt ki. Egyértelműen látszik, hogy a 15° és 30°-os nyílásszögű diffúzorok használata eredményezte a legszélesebb stabilitási tartományt, és 2-2,4-es légfeleslegtényező étrékig volt stabil a láng.



8.2 ábra. Lángstabilitási eredmények 1,6 bar porlasztónyomás esetén.

A légfelesleg tényező számítása a *8.1 képlet* szerint történt:

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{m}_{él}}{\dot{m}_{tü} \cdot L_0}, \qquad (8.1)$$

ahol L_0 *(kg/kg)* az elméletileg szükséges levegőmennyiség 1 kg tüzelőanyag tökéletes égéséhez. Az elméleti levegőszükséglet a tüzelőanyag összetételéből számítható, ami szabványosított [17].

A légfelesleg tényező hibaszámítása a *8.2 képlet* szerint történt:

$$\lambda_{hiba} = \sqrt{\left(\left(\frac{po_{rpl} \cdot 30}{v_{pl} \cdot 4} + \frac{po_{rpl} \cdot 3}{4}\right) \cdot \frac{\dot{m}_{pl}}{\dot{m}_{tü} \cdot L_0}\right)^2 + \left(\left(\frac{po_{rél} \cdot 30}{v_{él} \cdot 4} + \frac{po_{rél} \cdot 3}{4}\right) \cdot \frac{\dot{m}_{él}}{\dot{m}_{tü} \cdot L_0}\right)^2 + \left(\frac{0{,}2}{30 \cdot \dot{m}^3_{tü} \cdot L_0}\right)^2}, \qquad (8.2)$$

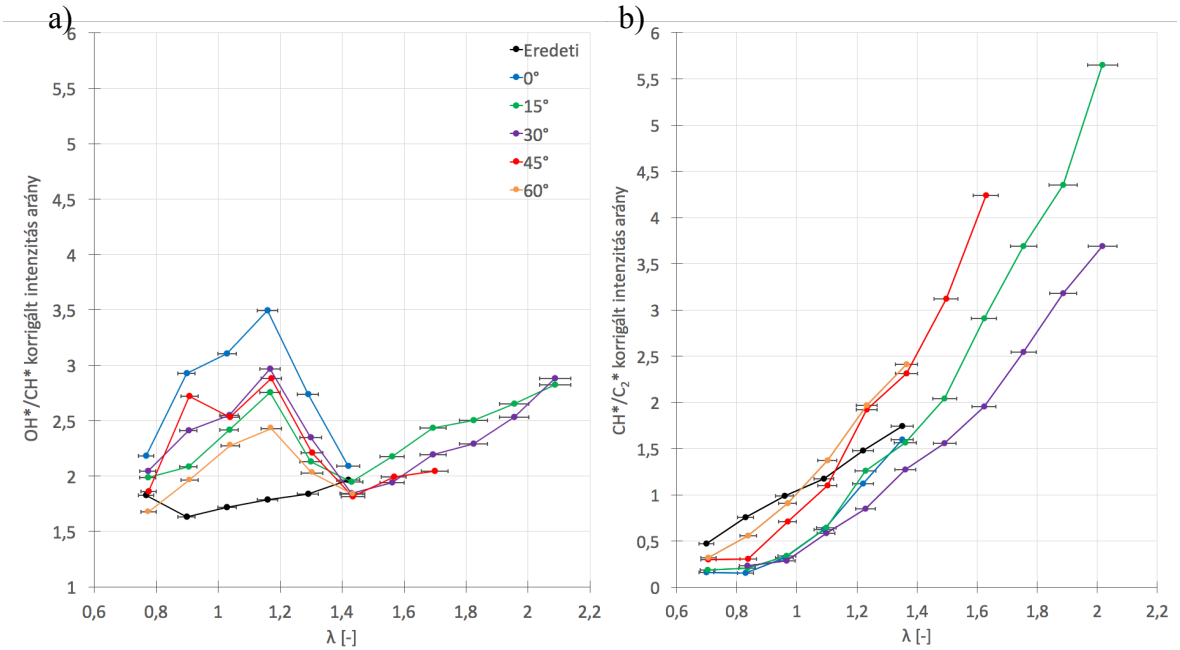
ahol po_{rpl} és $po_{rél}$ *(%)* rendre a porlasztó levegő és az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter pontossági osztálya, v_{pl} *(l/perc)* és $v_{él}$ *(m³/h)* rendre a porlasztó levegő és égéslevegő térfogatárama. A porlasztó levegőt mérő rotaméter pontossági osztálya 4%, az égéslevegőt mérőé 2,5%. A pontossági osztályok 1/4-e vonatkozik a teljes skálára, 3/4-e a mindenkori leolvasási pontosság. A porlasztó levegő térfogatáramát mérő rotaméter 30 l/perc-ig, az égéslevegő térfogatáramát mérő rotaméter 30 m³/h-ig van skálázva. A mérlegnek 0,2 g-os a pontatlansága, és 30 s-onként átlagolja a mért értékeket. A képlet első tagja az égéslevegő tömegárama szerinti derivált, második tagja a porlasztó levegő tömegárama szerinti derivált (mivel a közegek sűrűségét nem mértük, csak számítottuk, így a deriválások valójában a térfogatáramok szerint történnek). Mindkét tagban az összeg első tagja a teljes skálára vonatkoztatott

bizonytalanságot veszi figyelembe, a második tagja a leolvasási pontatlanságot. A képlet harmadik tagja a mérleg bizonytalanságából adódó hibát veszi figyelembe. A légfelesleg tényező számításából adódó pontatlanságok a *8.2.* és a *8.3 ábrán* fel vannak tüntetve hibasávokkal.

Ahhoz, hogy teljes képet lehessen adni a diffúzorok, különböző porlasztónyomások és légfeleslegek hatásáról, füstgázelemzést szükséges végezni az egyes esetekben, hiszen napjainkban egyre nagyobb prioritást kap a károsanyag kibocsátás csökkentése. Ha a füstgáz bármely összetevőjének koncentrációja átlépi a rá előírt kibocsátási határértéket, hiába a diffúzor stabil tulajdonsága, nem lehet használni.

8.2. Kemilumineszcens emisszió

A spektrometriai vizsgálat célja adott porlasztó nyomáson a különböző nyílásszögű diffúzorok használata mellett fellépő intenzitások arányának összehasonlítása. Az irodalomban legtöbbször megtalálható OH* és CH* gyökök kemilumineszcens intenzitásarányának mérése korábbi tapasztalataim szerint nem alkalmas arra, hogy szabályozó algoritmus segítségével kontrollálhassuk a lángot. Ha a CH* és C_2* gyökök intenzitásarányát vizsgáljuk, több esetben egyértékű függvényeket kapunk, ami így lehetővé teszi szabályozó algoritmus alkalmazását a lángszabályozásra. A két intenzitásarányból egy-egy példa látható a *8.3 ábrán*.



8.3 ábra. Intenzitásarányok 1,6 bar porlasztónyomás esetén: *a)* OH*/CH* intenzitásarány; *b)* CH*/C_2* intenzitásarány.

A később bemutatásra kerülő intenzitásarányokat és a károsanyag kibocsátást összehasonlító elemzések azt kívánják megmutatni, hogy feltételezhető-e valamilyen kapcsolat a két mennyiség között, azaz ha ismertek valamely gyökök intenzitásarányai, abból következtethetünk-e a károsanyag kibocsátásra.

Ismert, hogy az OH* gyök intenzitása közvetlen mérhető, mivel ehhez nem adódik hozzá másik kemilumineszcens összetevő intenzitása. Ez nem igaz a CH* gyökre, mivel ehhez hozzáadódik a CO_2* gyök szélessávú emissziója 350-600 nm között. Ezen kívül a feketetest sugárzást is számításba kell venni, ami nő a láng fényességével. Ez a jelenség a koromképződés előjele és megfigyelhető a spektrumban. Azaz a CH* gyök kemilumineszcens intenzitását korrigálni kell a feketetest sugárzás figyelembe vételével. Mivel a maximális lánghőmérséklet 2000 K körül várható [18], az OH* gyök intenzitását ez nem befolyásolja, így ezt az intenzitást nem kell korrigálni. Egy lehetséges megoldás [16] a kemilumineszcens intenzitás korrigálására, hogy az adott gyök emissziós csúcsából kivonjuk a csúcs melletti jelet. Ez a következő képpen történt: a csúcsnál egy alacsonyabb és magasabb hullámhossz tartományon 5-5 nm szélességű tartományon először átlagoltuk az intenzitásokat, majd megfelelően súlyoztuk a tartományokat.

Az OH*/CH* korrigált intenzitásarányok hibája a *8.3 képlet* szerint számítható:

$$\left.\frac{OH^*}{CH^*_{korr}}\right|_{hiba} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_1 \cdot CH^*_{korr}}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot OH^*}{k_2 \cdot (CH^*_{korr})^2}\right)^2}\ , \qquad (8.3)$$

ahol k_1 és k_2 konstansokkal rendre az OH* és CH* gyökök egységnyi hibáját szükséges nagyítani. Az 1-es szorzó annyit jelent, hogy a kapott intenzitás feltételezett bizonytalansága egy osztás. Az első tag az OH* gyök szerinti derivált, a második tag a CH* gyök szerinti derivált. Ennek a hibának a maximális értéke 3,5%, ez olyan kicsi, hogy a hibasávok a jelölők takarásába kerülnének, ezért nincsenek a *8.2 ábrán* feltüntetve. A későbbiekben még tárgyalásra kerülő CH*/C_2* és OH*/C_2* gyökök intenzitásarányának hibaszámítása a fentiekben ismertetetthez hasonló módon történt.

9. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A kibocsátási értékek érdemleges összehasonlíthatósága kedvéért a jelenleg Magyarországon érvényben lévő, KöM 7/1999 VII. 21-es rendelet szerint történt meg a kiértékelés. A 140 kW-nál nagyobb tüzelési teljesítményű gázturbinákra 15%-os oxigénszint mellett a megengedett maximális kibocsátás 100 mg/m^3 (80 ppm) CO és 200 mg/m^3 (97 ppm) NO_X. A különböző konstrukciók esetében mért kibocsátási értékek rendre a *9.1* és a *9.2 ábrán* láthatók. Az ábrákról leolvasható a ppm-ben mért kibocsátás a légfeleslegtényező és a porlasztónyomás függvényében. A feltüntetett értékek mellett az ábrák színezése is jellegre jól mutatja a kibocsátás változását (a két mért érték színskálája eltér egymástól). Megállapítható, hogy a sötétebb zöld tartományokban a CO kibocsátás a határérték alatt marad.

Az egyes ábrákon megjelenő károsanyag kibocsátási térképek alakjából következtethetünk a különböző konstrukciós megoldások eredményeképpen létrejövő lángstabilitási tartomány változására. Jól látható, hogy a *9.1 b)* és a *9.1 c) ábrákon* ez a mérhető tartomány jóval nagyobb területet fed le a légfeleslegtényező-porlasztónyomás síkon, mint a többi esetben. Korábbi tapasztalatok alapján ezen konstrukciók esetében a láng nagyobb légfeleslegtényező értékekig ($\lambda \simeq 2{,}2$) is képes stabil maradni, viszont a károsanyag kibocsátás vonatkoztatásában végzett mérések alkalmával miután a mért CO mennyisége meglehetősen átlépte a megengedett határértéket, már nem folytattuk tovább a méréseket.

A *9.1* és a *9.2 ábrákon* látható CO és NO_X kibocsátások abszolút hibáját a *9.1 képlet* szerint határozhatjuk meg:

$$K_{hiba} = \sqrt{\left(\frac{15}{O_{2m}} \cdot p_{K_m}\right)^2 + \left(\frac{K_m \cdot 0{,}15 \cdot V_{0sz} \cdot V_{CO_2}}{0{,}21 \cdot (V_{CO_2} - V_{0sz} \cdot CO_{2m})^2} \cdot p_{CO_{2m}}\right)^2}, \qquad (8.3)$$

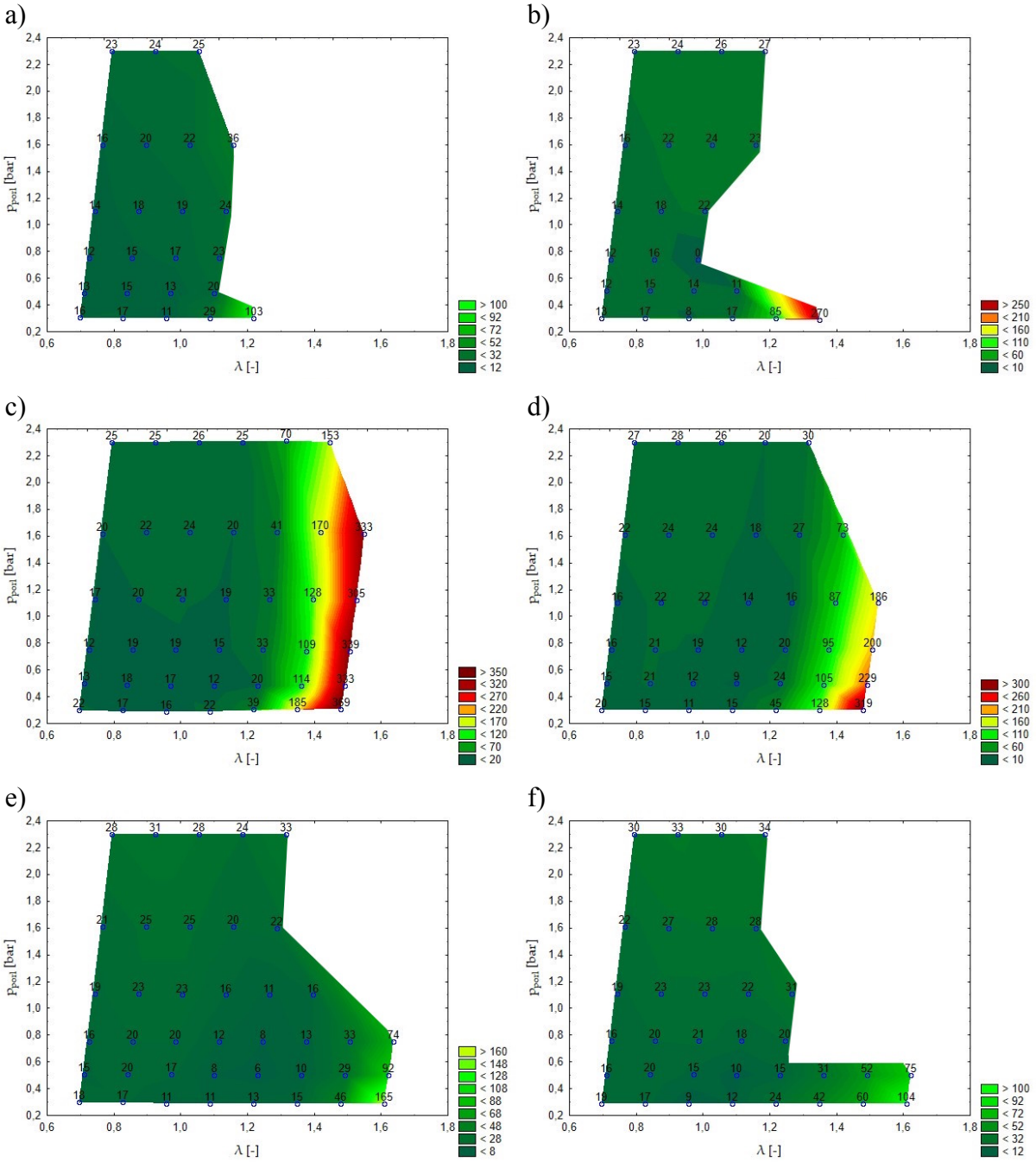
ahol K_{hiba} *[ppm]* az adott komponens hibája, O_{2m} *[%]* a mért CO_2 tartalomból számított O_2 tartalom, V_{0sz} *[Nm^3/kg tüza.]* a fajlagos száraz füstgázmennyiség, V_{CO2} *[Nm^3/kg tüza.]* a fajlagos szén-dioxid mennyiség, CO_{2m} *[-]* a mért CO_2 tartalom, K_m *[ppm]* az adott komponens füstgázelemzőről leolvasott mennyisége, p_{Km} *[ppm]* és p_{CO2m} *[ppm]* rendre a mért komponens és a mért CO_2 tartalom mérési pontossága, amelyek az *M.1 táblázatban* kerülnek ismertetésre. A relatív hibák maximális értéke a NOX kibocsátás esetében 250 %-nak, a CO kibocsátás esetében 125 %-nak adódott. A mérések során a műszer nullhelyeit folyamatosan regisztráltuk, így hiába rendelkezik a mérés nagy

bizonytalansággal, a tapasztalatok [19] arra engednek következtetni, hogy a *9.1* és *9.2 ábrákon* látható trendek ettől jóval pontosabbak.

9.1. CO

Az eredeti égőkialakítás esetében egyetlen olyan pontot mértünk ki, ahol a CO kibocsátás meghaladta a határértéket, ez nagy légfeleslegtényezőnél ($\lambda \simeq 1{,}2$) és kis porlasztónyomásnál ($p_{porl} \simeq 0{,}3$ bar) következett be. A többi mérési pontban a kibocsátás jóval a határérték alatt maradt, a megengedett értéknek csupán a 45%-át érte el. A többi esetben is megfigyelve az itt maximális kibocsátású pontot az látható, hogy a konstrukciós módosítás eredményeképpen a mért kibocsátás egy nagyságrenddel kisebb lesz, például a 45°-os félkúpszögű diffúzor esetében ennek a kibocsátásnak csak a 13%-át mértük.

Az egyszerű csőtoldat esetében kis porlasztónyomáson hiába volt tovább stabil a láng, a mért határon már 337%-os a CO kibocsátás a megengedetthez képest. A *9.1 b) ábrán* látható egy minimum hely, hol nem mértünk CO kibocsátást, ez a $\lambda \simeq 1$ és a $p_{porl} \simeq 0{,}7$ bar pontban található. Ehhez hasonlóan a *9.1 c), d), e)* és *f) ábrákon* is megfigyelhető egy minimum érték a kibocsátási térképeken, a $\lambda \simeq 1$ és $p_{porl} \simeq 0{,}5$ bar pont körül.



9.1 ábra. CO kibocsátás ppm-ben: *a)* Eredeti konstrukció; *b)* Egyszerű csőtoldat; *c)* 15°-os félkúpszögű diffúzor; *d)* 30°-os félkúpszögű diffúzor; *e)* 45°-os félkúpszögű diffúzor; *f)* 60°-os félkúpszögű diffúzor.

A 15°-os és a 30°-os félkúpszögű diffúzor esetében a térképek színezettsége alapján hasonlóan változik a paraméterek függvényében a CO kibocsátás. Bizonyos légfeleslegtényező értékig ($\lambda \approx 1{,}3$) nem látható mérvadó változás a kibocsátásban, míg $\lambda \approx 1{,}3$ fölött nagymértékű növekedés tapasztalható. Kiváltképp a *9.1 c) ábra* esetében figyelhető meg, hogy a nagyobb légfeleslegtényező értékeknél a kibocsátási térképen a szintvonalak a függőlegeshez közelítenek. Következtetés képpen ebben a tartományban a CO kibocsátás jóformán csak a légfeleslegtényezőtől függ, a

porlasztónyomástól független. Mivel ebben a tartományban a kibocsátás messze meghaladja az előírt maximumot, egy adott működtetni kívánt berendezésben ezen kedvező tulajdonságot nem lehet kihasználni, hiszen ebben a tartományban a konstrukció nem alkalmazható.

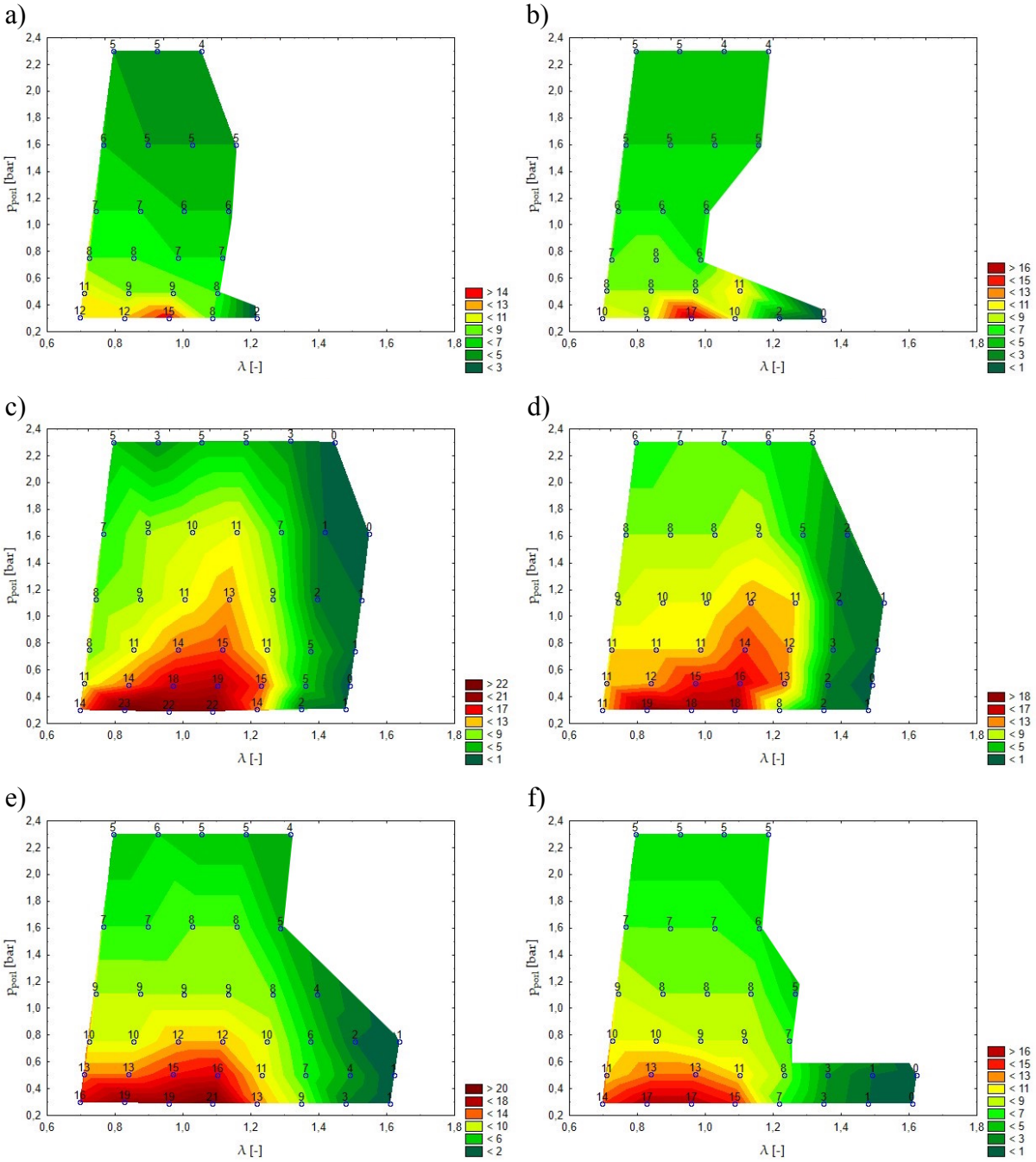
A 45°-os és a 60°-os félkúpszögű diffúzor esetében csak igen magas légfeleslegtényező értéknél megy a CO kibocsátás a megengedett fölé. Elsősorban a 45°-os félkúpszögű megoldás lehet a legkedvezőbb, hiszen itt széles tartományon tudtunk alacsony CO kibocsátást mérni.

A határérték alatti tartományokban minden konstrukció esetében megállapítható, hogy adott légfeleslegtényező mellett a porlasztónyomás növelésével nő a CO kibocsátás (eltekintve a korábban bemutatott minimum helyektől). A határérték felett a kibocsátás fordított karakterisztikát mutat, azaz adott légfeleslegtényező mellett a porlasztónyomás növelésével csökken a CO kibocsátás.

9.2. NOx

A mért NOx értéke minden mérési pontban jóval a kibocsátási határérték alatt maradt, maximális értéke csupán 24%-a a megengedettnek, ez a 15°-os félkúpszögű diffúzor esetében volt mérhető. Tehát az NOx kibocsátás nem korlátozza a diffúzorok alkalmazását. A *9.2 ábrán* látható, hogy minden konstrukció esetében a kibocsátás maximuma a legkisebb vizsgált porlasztónyomásnál volt mérhető, minimuma pedig a nagyobb mért légfeleslegtényező értékeknél figyelhető meg. A kibocsátási térképeken az látható, hogy a maximum helyek mintegy centrumként viselkednek és a nagyobb porlasztónyomás és légfelesleg felé közeledve közel egyenletesen csökken az NOx kibocsátás.

Összességében a *9.2 a) ábrán*, az eredeti égőkialakítás esetében figyelhető meg a legkevesebb NOx kibocsátás. A *9.2 b) ábrán*, az egyszerű csőtoldat alkalmazásakor a magasabb porlasztónyomások esetén már magasabb NOx kibocsátás volt mérhető, illetve alacsony porlasztónyomásokon szélesebb lett a magasabb kibocsátás tartománya.



9.2 ábra. NOx kibocsátás ppm-ben: *a)* Eredeti konstrukció; *b)* Egyszerű csőtoldat; *c)* 15°-os félkúpszögű diffúzor; *d)* 30°-os félkúpszögű diffúzor; *e)* 45°-os félkúpszögű diffúzor; *f)* 60°-os félkúpszögű diffúzor.

Ehhez képest a 15°-os félkúpszögű diffúzor esetében látványos változás következett be, ahogy az a *9.2 c) ábrán* is látható. Egyre nagyobb területen volt mérhető relatív magas kibocsátás a korábbi értékekhez képest. A mérési tartomány szélén viszont NOx kibocsátás több pontban egyáltalán nem volt mérhető. Tehát nagy porlasztónyomás és légfeleslegtényező értékek esetében az égés során nem keletkezik NOx. A *9.2 d) ábrán* látható kibocsátási térkép igen hasonló a *9.2 c) ábrán* látotthoz, illetve megfigyelhető az ábrákon, hogy nagy légfeleslegtényező értékeknél a kibocsátás gyakorlatilag a

porlasztónyomástól független, azaz csak a légfeleslegtényező függvénye. Ahogy a *9.1 c)* és *d) ábrák* mutatják, ez a viselkedést a CO kibocsátás esetében is tapasztalható volt.

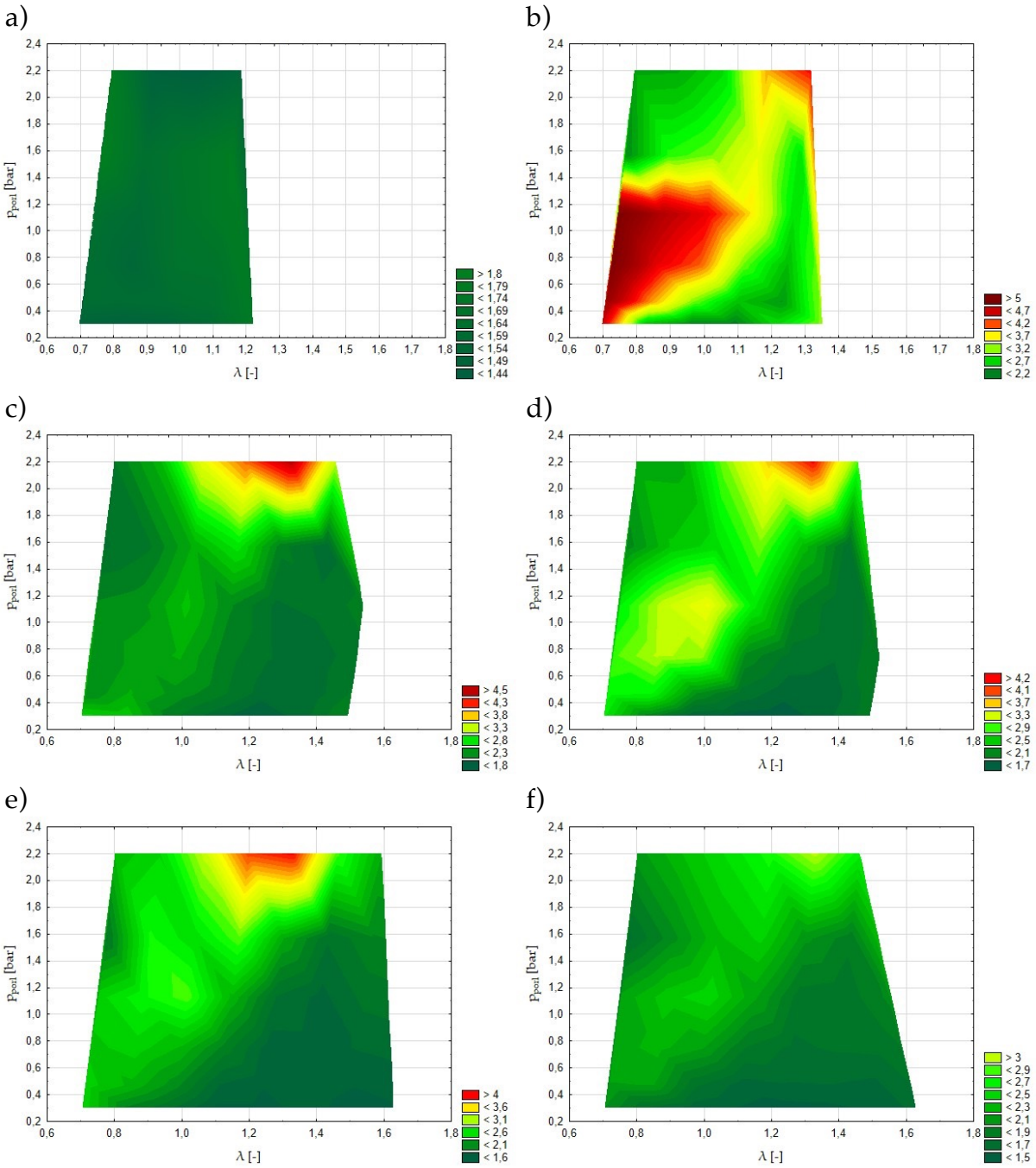
A *9.2 e)* és *f) ábrák* szerint a félkúpszög további növelésével az átlagos NO_X kibocsátás valamelyest csökken, bár az eredeti és a csőtoldatos kialakítás esetében mért kibocsátásokat még jelentősen meghaladja.

9.3. A spektroszkópia és a károsanyag kibocsátás

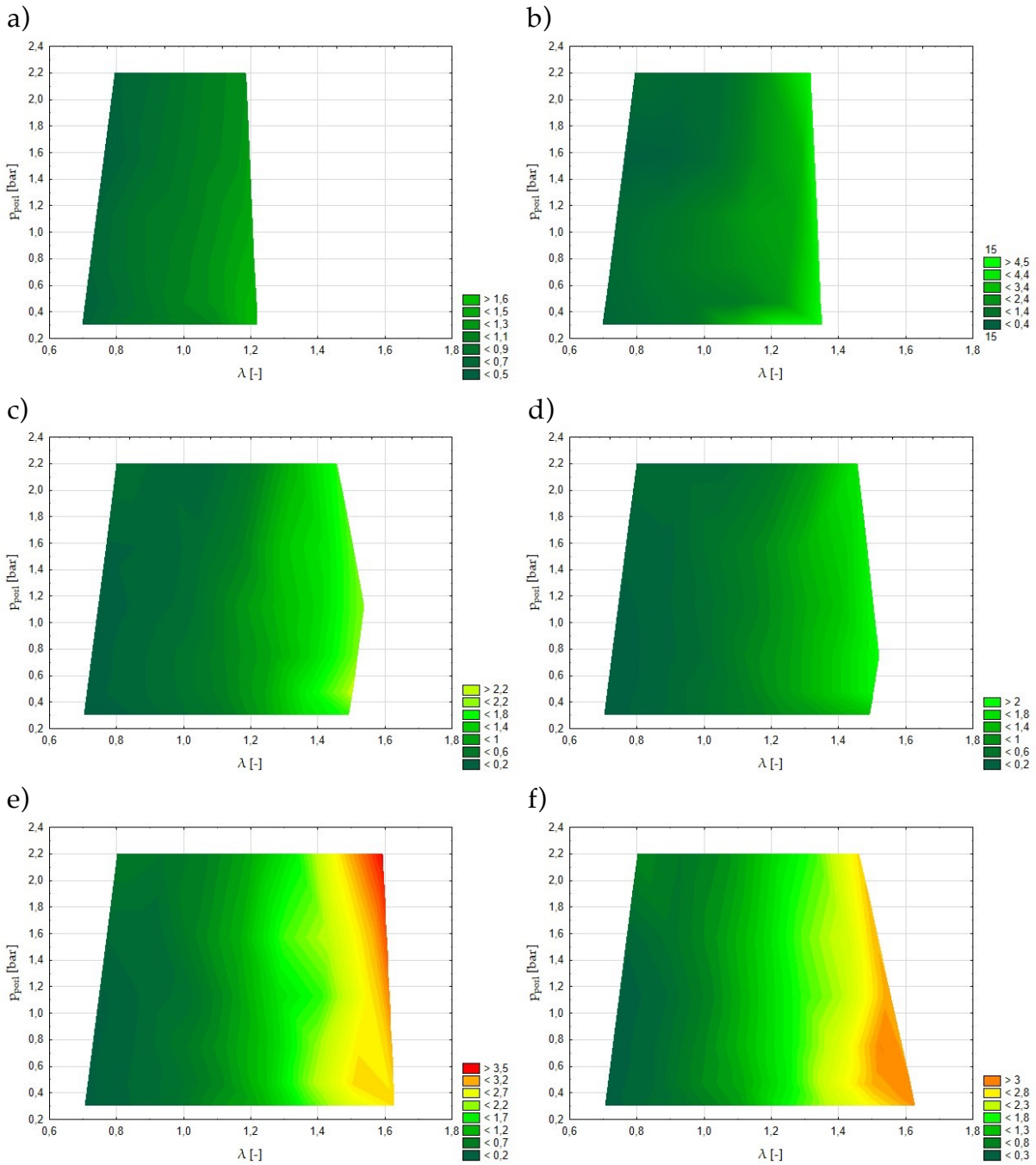
A *9.2. fejezetben* bemutatottakhoz hasonló térképek állíthatók össze a károsanyag kibocsátás helyett a mért gyökök intenzitásarányával. A *9.3 ábrán* látható az OH*/CH* gyökök intenzitásaránya a porlasztónyomás és a légfeleslegtényező függvényében. A *9.3 b) ábrán* az egyszerű csőtoldat esetében az intenzitásaránynak a többitől teljesen eltérő, eredeti karakterisztikája látható. A többi kialakítás esetében hasonló a térképek színezettsége, azaz magas porlasztónyomáson és $\lambda \simeq 1{,}3$ légfeleslegtényező érték körül tapasztalható az intenzitásarány maximuma. Az említett négy konstrukció közül ez az érték a 15°-os félkúpszögű kialakítás esetében a legmagasabb. Az intenzitásarányok minimális értéke magas légfelesleg és alacsony porlasztónyomás esetén tapasztalható. A térképek színezését összehasonlítva a CO vagy az NO_X kibocsátáshoz tartozó ábrák színezésével, könnyen belátható, hogy az OH*/CH* gyökök intenzitásaránya és a CO vagy NO_X kibocsátás között nem vonható párhuzam.

A *9.4 ábrán* a CH^*/C_2^* intenzitásarányok láthatók. A légfelesleg növekedésével egyre nő az intenzitásarányok értéke, és a 45°-os kialakítás esetében a legmagasabb. Az ábrák színezése szerint a közel függőleges sávokban az intenzitásarány állandó, azaz nem függ a porlasztónyomástól, csak a légfeleslegtényezőtől. Ezt a jelleget tapasztaltuk a *9.1 c), d)* és a *9.2 c), d) ábrán* is nagy légfeleslegtényező értékeknél. A CH^*/C_2^* intenzitásarányok és az NO_X, illetve CO kibocsátások hasonló viselkedése értelmében az intenzitások mérésével és az arányok meghatározásával következtetni lehet a kibocsátásra az adott tartományban.

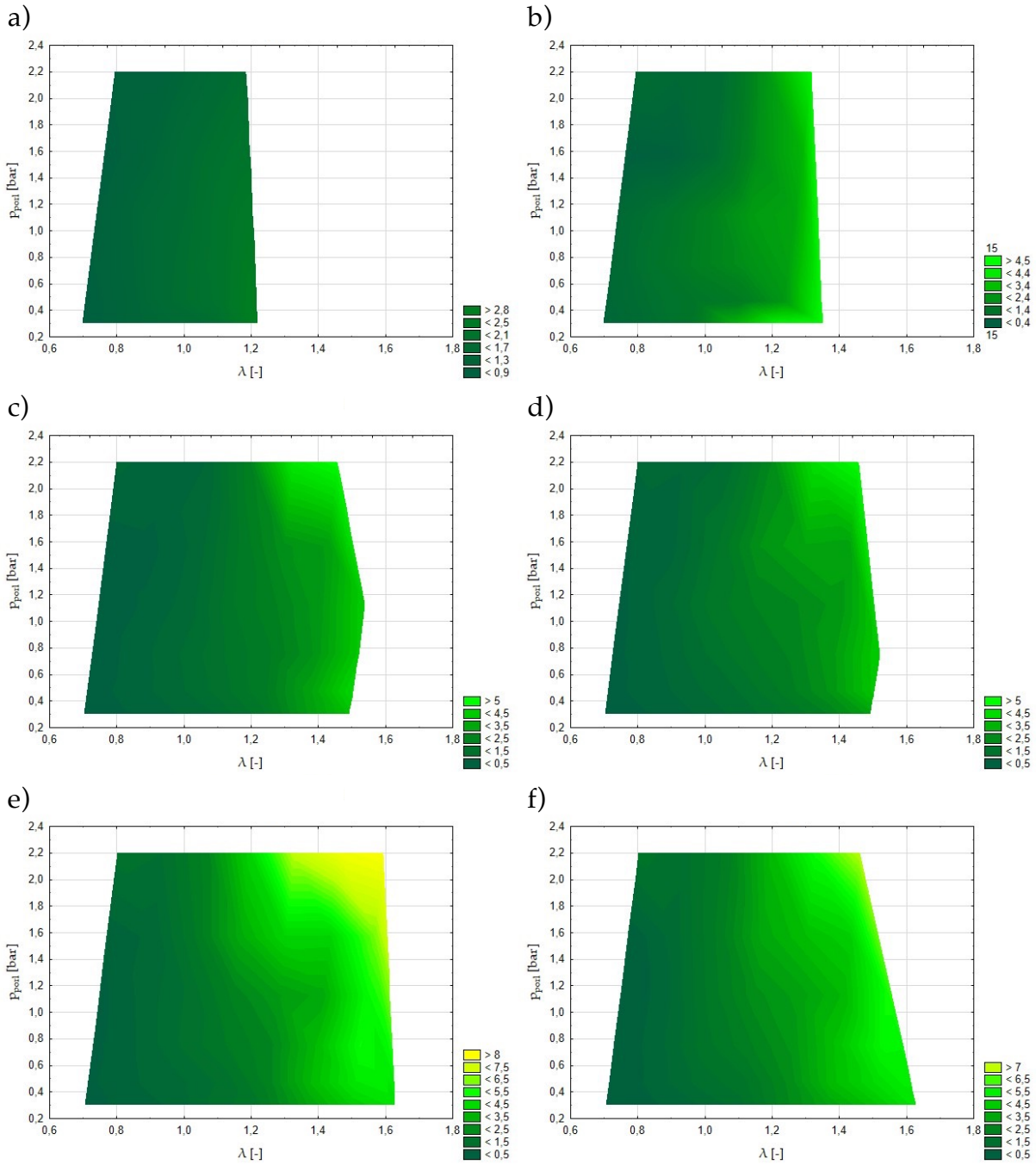
A *9.5 ábrán* az OH^*/C_2^* intenzitásarányok láthatók. Ebben az esetben is nő az intenzitásarányok értéke a légfelesleg növekedésével, viszont nem tapasztalható a légfeleslegtényezőtől vagy a porlasztónyomástól való függetlensége az arányoknak. A *9.1* és *9.2 ábrákra* visszatekintve megállapítható, hogy az OH^*/C_2^* intenzitásarány változásával nem írható le az NO_X, illetve CO kibocsátás.



9.3 ábra. Az OH*/CH* gyökök intenzitásaránya: *a)* Eredeti konstrukció; *b)* Egyszerű csőtoldat; *c)* 15°-os félkúpszögű diffúzor; *d)* 30°-os félkúpszögű diffúzor; *e)* 45°-os félkúpszögű diffúzor; *f)* 60°-os félkúpszögű diffúzor.



9.4 ábra. A CH*/C_2* gyökök intenzitásaránya: *a)* Eredeti konstrukció; *b)* Egyszerű csőtoldat; *c)* 15°-os félkúpszögű diffúzor; *d)* 30°-os félkúpszögű diffúzor; *e)* 45°-os félkúpszögű diffúzor; *f)* 60°-os félkúpszögű diffúzor.



9.5 ábra. Az OH*/C_2* gyökök intenzitásaránya: *a)* Eredeti konstrukció; *b)* Egyszerű csőtoldat; *c)* 15°-os félkúpszögű diffúzor; *d)* 30°-os félkúpszögű diffúzor; *e)* 45°-os félkúpszögű diffúzor; *f)* 60°-os félkúpszögű diffúzor.

10. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TOVÁBBLÉPÉSI LEHETŐSÉGEK

Dolgozatomban egy adott gázturbinaégő különböző kialakításainak hatását vizsgáltam a károsanyag kibocsátásra gázolaj tüzelőanyag alkalmazása esetén. A mérések során a porlasztónyomás és a légfeleslegtényező változtatásával állítottunk be különböző üzemállapotokat. Korábbi mérési tapasztalatok és gyakorlati megfontolások alapján a porlasztónyomást 0,3-2,2 bar túlnyomás között változtattuk, míg a légfeleslegtényező értékét a 0,7-től növeltük, míg az le nem fújta a lángot. Az égőszájra helyezett különböző félkúpszögű diffúzoros kialakítású elemek alkalmazásakor a károsanyag kibocsátás ezen esetben jellemző fő összetevőit, a füstgáz NO_X és CO tartalmát mértük. A kibocsátási értékek érdemleges összehasonlíthatósága kedvéért a jelenleg Magyarországon érvényben lévő, KöM 7/1999 VII. 21-es rendelet szerint történt meg a kiértékelés, melyben a 140 kW-nál nagyobb tüzelési teljesítményű gázturbinákra 15%-os oxigénszint mellett vannak meghatározva a határértékek.

A CO kibocsátásról általánosságban megállapítható, hogy a légfelesleg növelésével egyre nagyobb mértékű, és a porlasztónyomástól csak kis mértékben függ. A lángstabilitás szempontjából igen kedvező tulajdonságokat mutató 15°-os és 30°-os félkúpszögű diffúzor esetében azt tapasztaltuk, hogy magas légfelesleg esetén, tehát az üzemi tartomány szélén már akkora CO kibocsátást eredményez, ami messze nem megengedhető, így ebben a tartományban ez a konstrukció a gyakorlatban nem alkalmazható. A 45°-os és 60°-os félkúpszögű kialakítások az eredeti konstrukcióhoz képest szélesebb üzemi tartománnyal rendelkeztek, és a mért CO kibocsátás csak néhány pontban, a magas légfeleslegtényező értékeknél haladta meg a megengedhetőt, egyébként széles tartományban messze az alatt maradt. Minden diffúzoros konstrukció esetében található egy minimum érték a CO kibocsátásban a $\lambda \approx 1$ és $p_{porl} \approx 0{,}6$ bar pont körül.

A mért NO_X értéke minden mérési pontban jóval a kibocsátási határérték alatt maradt, maximális értéke csupán 24%-a a megengedettnek, ez a 15°-os félkúpszögű diffúzor esetében volt mérhető. Tehát a NO_X kibocsátás nem korlátozza a diffúzorok alkalmazását. Minden konstrukció esetében a kibocsátás maximuma a legkisebb vizsgált porlasztónyomásnál volt mérhető, minimuma pedig a nagyobb mért légfeleslegtényező értékeknél figyelhető meg, itt több pontban egyáltalán nem mértünk NO_X tartalmat. A nagyobb porlasztónyomás és légfelesleg felé közeledve

közel egyenletesen csökken a NO_X kibocsátás. Az eredeti égőkialakítás esetében figyelhető meg a legkisebb NO_X kibocsátás. A 15°-os és 30°-os félkúpszögű diffúzorok esetében a magas légfeleslegtényező értékeknél a CO kibocsátásnál tapasztalthoz hasonlóan a kibocsátás kevéssé függött a porlasztónyomástól, nagyrészt csak a légfeleslegtényező értéke határozta meg.

Összességében elmondható, hogy károsanyag kibocsátás szempontjából a legkedvezőbb konstrukció a 45°-os félkúpszögű diffúzor, mivel ez esetben maradtak a mért CO és NO_X értékek a legalacsonyabbak.

A spektroszkópia által meghatározható OH*/CH* vagy OH*/C_2* intenzitásarányok és a károsanyag kibocsátás változása között a mérési eredmények alapján nem vonható párhuzam. A CH*/C_2* intenzitásarányok értéke nem függ a porlasztónyomástól, csak a légfeleslegtényezőtől. Ez a viselkedés hasonló a bizonyos tartományokban a CO és NO_X kibocsátásoknál tapasztalthoz, azaz ezekben a tartományokban a CH*/C_2* intenzitásarányokból következtethetünk a CO és NO_X kibocsátás értékére.

A későbbiekben hasznos lenne a méréseket egy pontosabb füstgázelemzővel is elvégezni. A lehetőségekhez mérten a mérőberendezés fejlesztése egyértelműen szükséges a továbbiakban. Például ha az égő változtatható perdítőelem szöggel is tudna működni, meghatározható lenne a perdületparaméter változtatásának hatása mind a károsanyag kibocsátásra, mind pedig az üzemi tartomány határaira.

11. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

[1] A. H. Lefebvre and D. R. Ballal, *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions*, 3. CRC Press Taylor & Francis Group, 2010.

[2] E. Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K., and Godden, "Particulate Air Pollution and Acute Health Effects," *Lancet*, vol. 345, pp. 176–8, 1995.

[3] Z. Katona and I. Gács, "Környezetvédelem," Budapest, 1998.

[4] K. K. Rink and A. H. Lefebvre, "Influence of Fuel Drop Size and Combustor Operating Conditions on Pollutant Emissions," *Int. J. Turbo Jet Engines*, vol. 6, no. 2, pp. 113–22, 1989.

[5] T. S. Snyder, T. J. Rosfjord, J. B. McVey, and L. M. Chiappetta, "Comparison of Liquid Fuel/Air Mixing and NOx Emissions for a Tangential Entry Nozzle," in *ASME Paper 94-GT-283*, 1994.

[6] A. G. Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, 2nd ed. London: Chapman and Hall Ltd, 1974.

[7] C. S. Panoutsos, Y. Hardalupas, and A. M. K. P. Taylor, "Numerical evaluation of equivalence ratio measurement using OH* and CH* chemiluminescence in premixed and non-premixed methane-air flames," *Combust. Flame*, vol. 156, pp. 273–291, 2009.

[8] B. Higgins, M. Q. McQuay, F. Lacas, J. C. Rolon, N. Darabiha, and S. Candel, "Systematic measurements of OH chemiluminescence for fuel-lean, high-pressure, premixed, laminar flames," *Fuel*, vol. 80, pp. 67–74, 2001.

[9] J. Ballester and T. García-Armingol, "Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, pp. 375–411, 2010.

[10] B. Higgins, M. McQuay, F. Lacas, and S. Candel, "An experimental study on the effect of pressure and strain rate on CH chemiluminescence of premixed fuel-lean methane / air flames," *Fuel*, vol. 80, pp. 1583–1591, 2001.

[11] D. Guyot, F. Guethe, B. Schuermans, A. Lacarelle, and C. O. Paschereit, "CH*/OH* Chemiluminescence Response of an Atmospheric Premixed Flame Under Varying Operating Conditions," in *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air*, 2010.

[12] Á. B. Palotás, *Ipari tüzeléstechnika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.

[13] Gy. Hidegh, "Előkeveréses égő stabilitási és spektrometriai vizsgálata," in *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Tudományos Diákköri Konferencia, Energetika 1 szekció*, 2015.

[14] Gy. Hidegh and V. Józsa, "Diffúzor alkalmazása perdületes égő lánglefúvási stabilitásának növelésére," *Energiagazdálkodás*, vol. 3–4, pp. 17–20, 2016.

[15] A. Kun-Balog, V. Józsa, and K. Sztankó, "Pollutant emission analysis of aqueous bioethanol combustion," *Proc. 11th Conf. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, no. SDEWES2016.0369, p. 8, 2016.

[16] A. Kun-Balog and V. Józsa, "Spectroscopic analysis of crude rapeseed oil flame," *Fuel Process. Technol.*, vol. 139, pp. 61–66, 2015.

[17] *MSZ EN 590:2013 Gépjármű-hajtóanyagok, ICS 75.160.20 Folyékony tüzelőanyagok*.

[18] Gy. Hidegh, "BSc. Szakdolgozat," Budapest, 2016.

[19] V. Józsa and A. Kun-Balog, "Stability and emission analysis of crude rapeseed oil combustion," *Fuel Process. Technol.*,Accepted for publication, p. 7, 2016.

[20] *testo 350 · Combustion & Emission Analyzer*.

MELLÉKLET

MÉRŐBERENDEZÉS RÉSZEI

Ventilátor

- Típus: Szellőző Művek Budapest, KNV 71
- Névleges nyomás növekedés: 750-487 Pa (540-1290 Nm^3/h-nál)
- Névleges fordulatszám: 2880 1/perc

Rotaméter (égés levegő)

- Típus: Unirota 93-50-196
- Mérési tartomány: 3-30 Nm3/h
- Pontosság: 1,6 %-os pontossági osztály a VDI/VDE 3513 útmutató szerint

Rotaméter (porlasztó levegő)

- Típus: Unirota RM-02 12-468-431
- Mérési tartomány: 3-30 Nl/perc
- Pontosság: 4,0 %-os pontossági osztály a VDI/VDE 3513 útmutató szerint

Mérleg

- Típus: Radwag WLC 12/30/C1/R
- Pontosság: 0,2 g
- Hitelesítve: Országos Mérésügyi Hivatal

Nyomástávadó

- Típus: Siemens SITRANS P serie Z
- Modell szám: 7MF1563-5BE00
- Mérési tartomány: 0-4 bar abszolút nyomás
- Pontosság: 1000 kPa

Levegő előmelegítő

- Típus: egyedi, rendelésre gyártott
- Pontosság: 1 °C
- Szabályzó: relé alapú, HAGA KD48P-1200
- Megjegyzés: az égési levegőt 400 °C-ra melegíti föl

Hordozható füstgázelemző

- Típus: Testo 350
- Tételszám: 60253978
- Pontosság: az *M.1 táblázatban* feltüntetve
- Megjegyzés: a CO, NO_x és CO_2 értékek mérése

Szivattyú

- Típus: Bosch JKB850C3
- Vezérlés: DC feszültség

Nyomásszabályzó

- Típus: Rexroth AS3-FRE-6012-GAU FD:208
- Belépő nyomás: 6 bar

Mért komponens	Mérési tartomány	Felbontás	Pontosság (adott tartományban)	Válaszidő
CO	0-10000 ppm	1 ppm	±10 ppm (0-199 ppm), ±5 % (200-2000 ppm)	< 40 s
NO_X	0-4000 ppm	1 ppm	±5 ppm (0-99 ppm)	< 30 s
CO_2	0-50 V/V%	0,01 V/V%	±0,3 V/V% ±1 % (0-25 V/V%)	< 10 s

M.1 táblázat. Hordozható füstgázelemző pontossága [20].

MÉRT ÉS SZÁMÍTOTT ÉRTÉKEK

Konfig.	P_{porl} [bar_g]	λ [-]	NO_X [ppm]	CO [ppm]	NO_X [mg/m³]	CO [mg/m³]	NO_X/NO_{Xmeg} [%]	CO/CO_{meg} [%]	NO_{Xhiba} [ppm]	CO_{hiba} [ppm]	NO_{Xhiba} [%]	CO_{hiba} [%]
eredeti	0,31	0,697	12,138	15,931	24,915	19,905	12,458	19,905	3,793	7,586	31,250	47,619
eredeti	0,3	0,827	12,290	17,449	25,227	21,801	12,613	21,801	3,793	7,586	30,864	43,478
eredeti	0,3	0,957	15,476	11,379	31,767	14,218	15,884	14,218	3,793	7,586	24,510	66,667
eredeti	0,3	1,088	8,042	28,828	16,506	36,019	8,253	36,019	3,793	7,586	47,170	26,316
eredeti	0,3	1,218	2,124	103,174	4,360	128,910	2,180	128,910	3,793	7,587	178,571	7,353
eredeti	0,49	0,709	11,379	12,897	23,358	16,114	11,679	16,114	3,793	7,586	33,333	58,824
eredeti	0,49	0,840	9,205	15,173	18,894	18,957	9,447	18,957	3,793	7,586	41,209	50,000
eredeti	0,49	0,970	9,306	12,897	19,102	16,114	9,551	16,114	3,793	7,586	40,761	58,824
eredeti	0,49	1,100	7,890	19,724	16,195	24,645	8,097	24,645	3,793	7,586	48,077	38,462
eredeti	0,75	0,725	8,094	12,294	16,614	15,361	8,307	15,361	3,842	7,684	47,468	62,500
eredeti	0,75	0,855	8,155	15,291	16,740	19,106	8,370	19,106	3,823	7,646	46,875	50,000
eredeti	0,75	0,985	7,466	16,761	15,326	20,942	7,663	20,942	3,809	7,619	51,020	45,455
eredeti	0,75	1,116	6,801	22,840	13,960	28,537	6,980	28,537	3,807	7,613	55,970	33,333
eredeti	1,1	0,743	6,932	13,762	14,229	17,195	7,115	17,195	3,823	7,646	55,147	55,556

eredeti	1,1	0,873	7,009	17,523	14,387	21,894	7,194	21,894	3,809	7,619	54,348	43,478
eredeti	1,1	1,004	6,335	19,006	13,004	23,747	6,502	23,747	3,801	7,602	60,000	40,000
eredeti	1,1	1,134	5,668	24,293	11,635	30,353	5,818	30,353	3,796	7,592	66,964	31,250
eredeti	1,6	0,766	5,798	16,022	11,902	20,018	5,951	20,018	3,815	7,629	65,790	47,619
eredeti	1,6	0,896	5,123	19,780	10,515	24,714	5,257	24,714	3,804	7,608	74,257	38,462
eredeti	1,6	1,026	5,209	22,000	10,693	27,488	5,346	27,488	3,793	7,586	72,816	34,483
eredeti	1,6	1,157	4,542	36,337	9,324	45,402	4,662	45,402	3,785	7,570	83,333	20,833
eredeti	2,3	0,794	4,549	22,680	9,337	28,337	4,668	28,337	3,790	7,581	83,333	33,426
eredeti	2,3	0,925	4,542	24,099	9,324	30,110	4,662	30,110	3,785	7,570	83,333	31,414
eredeti	2,3	1,055	3,782	24,775	7,764	30,955	3,882	30,955	3,782	7,565	100,000	30,534
0°	2,3	0,794	4,574	22,618	9,390	28,260	4,695	28,260	3,812	7,624	83,333	33,708
0°	2,3	0,925	4,555	23,977	9,350	29,958	4,675	29,958	3,796	7,592	83,333	31,662
0°	2,3	1,055	3,788	26,136	7,775	32,655	3,888	32,655	3,788	7,576	100,000	28,986
0°	2,3	1,185	3,780	26,774	7,759	33,452	3,879	33,452	3,780	7,560	100,000	28,235
0°	1,6	0,766	5,371	16,369	11,025	20,452	5,512	20,452	3,836	7,673	71,429	46,875
0°	1,6	0,896	5,352	22,364	10,986	27,942	5,493	27,942	3,823	7,646	71,429	34,188
0°	1,6	1,026	5,314	23,661	10,908	29,563	5,454	29,563	3,796	7,592	71,429	32,086
0°	1,6	1,157	4,539	22,758	9,317	28,435	4,658	28,435	3,782	7,565	83,333	33,241
0°	1,1	0,743	6,147	13,831	12,618	17,281	6,309	17,281	3,842	7,684	62,500	55,556
0°	1,1	0,873	6,117	17,712	12,555	22,131	6,278	22,131	3,823	7,646	62,500	43,166
0°	1,1	1,004	6,073	21,510	12,466	26,875	6,233	26,875	3,796	7,592	62,500	35,294
0°	0,74	0,724	6,925	11,927	14,215	14,902	7,108	14,902	3,847	7,695	55,556	64,516
0°	0,74	0,855	7,662	15,835	15,727	19,785	7,864	19,785	3,831	7,662	50,000	48,387
0°	0,74	0,985	6,127	19,786	12,577	24,722	6,289	24,722	3,830	7,659	62,500	38,710
0°	0,51	0,710	7,667	11,501	15,739	14,370	7,869	14,370	3,834	7,667	50,000	66,667
0°	0,51	0,840	8,452	15,368	17,350	19,201	8,675	19,201	3,842	7,684	45,455	50,000
0°	0,51	0,970	8,392	14,496	17,227	18,112	8,613	18,112	3,815	7,629	45,455	52,632
0°	0,51	1,101	10,689	11,452	21,940	14,309	10,970	14,309	3,817	7,635	35,714	66,667
0°	0,3	0,697	10,061	13,157	20,652	16,438	10,326	16,438	3,870	7,739	38,462	58,824
0°	0,3	0,827	9,194	16,856	18,873	21,061	9,436	21,061	3,831	7,662	41,667	45,455
0°	0,3	0,957	16,797	7,635	34,478	9,539	17,239	9,539	3,817	7,635	22,727	100,000
0°	0,3	1,088	9,932	16,809	20,388	21,001	10,194	21,001	3,820	7,640	38,462	45,455
0°	0,3	1,218	1,526	85,449	3,132	106,764	1,566	106,764	3,815	7,630	250,000	8,929
0°	0,29	1,348	0,000	270,080	0,000	337,450	0,000	337,450	3,815	13,506		5,001
15°	0,3	0,697	14,072	21,890	28,886	27,351	14,443	27,351	3,909	7,818	27,778	35,714

15°	0,3	0,827	22,709	17,200	46,615	21,490	23,307	21,490	3,909	7,818	17,214	45,455
15°	0,29	0,957	21,791	15,512	44,728	19,381	22,364	19,381	3,878	7,756	17,797	50,000
15°	0,29	1,088	21,891	21,820	44,934	27,263	22,467	27,263	3,889	7,778	17,767	35,647
15°	0,31	1,218	14,028	39,410	28,794	49,240	14,397	49,240	3,856	7,712	27,487	19,568
15°	0,31	1,349	2,483	184,907	5,096	231,031	2,548	231,031	3,834	9,247	154,412	5,001
15°	0,31	1,479	0,975	368,595	2,001	460,538	1,000	460,538	3,790	18,432	388,889	5,001
15°	0,5	0,710	11,093	12,586	22,770	15,726	11,385	15,726	3,870	7,739	34,884	61,489
15°	0,49	0,840	13,569	18,202	27,852	22,742	13,926	22,742	3,903	7,807	28,767	42,890
15°	0,48	0,970	17,509	17,462	35,940	21,818	17,970	21,818	3,903	7,807	22,293	44,706
15°	0,48	1,100	18,875	11,892	38,743	14,858	19,372	14,858	3,856	7,711	20,428	64,846
15°	0,48	1,231	15,110	20,489	31,015	25,599	15,508	25,599	3,870	7,739	25,610	37,774
15°	0,48	1,361	5,042	113,963	10,350	142,391	5,175	142,391	3,836	7,674	76,087	6,734
15°	0,48	1,491	0,470	332,955	0,965	416,008	0,482	416,008	3,796	16,650	807,692	5,001
15°	0,75	0,725	8,255	12,098	16,945	15,115	8,472	15,115	3,870	7,739	46,875	63,973
15°	0,75	0,855	10,668	19,200	21,897	23,990	10,948	23,990	3,889	7,778	36,459	40,512
15°	0,75	0,985	13,806	19,227	28,339	24,024	14,169	24,024	3,886	7,773	28,150	40,426
15°	0,75	1,116	14,536	14,521	29,838	18,143	14,919	18,143	3,864	7,728	26,582	53,221
15°	0,75	1,246	11,432	32,967	23,467	41,190	11,733	41,190	3,847	7,695	33,654	23,342
15°	0,74	1,376	4,534	108,953	9,307	136,130	4,653	136,130	3,839	7,679	84,677	7,048
15°	0,74	1,507	0,720	338,633	1,478	423,102	0,739	423,102	3,780	16,934	525,000	5,001
15°	1,13	0,744	7,717	16,977	15,840	21,212	7,920	21,212	3,859	7,717	50,000	45,455
15°	1,13	0,874	9,281	19,999	19,051	24,988	9,526	24,988	3,867	7,734	41,667	38,674
15°	1,13	1,004	10,845	21,469	22,261	26,824	11,130	26,824	3,873	7,746	35,714	36,083
15°	1,13	1,135	13,123	18,968	26,937	23,699	13,468	23,699	3,860	7,719	29,412	40,698
15°	1,13	1,265	9,211	33,336	18,908	41,651	9,454	41,651	3,838	7,676	41,667	23,027
15°	1,13	1,395	2,283	128,093	4,687	160,045	2,344	160,045	3,806	7,612	166,667	5,943
15°	1,12	1,526	0,755	304,518	1,550	380,477	0,775	380,477	3,777	15,228	500,000	5,001
15°	1,62	0,766	6,940	20,050	14,246	25,051	7,123	25,051	3,856	7,711	55,556	38,462
15°	1,63	0,897	8,500	22,188	17,448	27,723	8,724	27,723	3,864	7,727	45,455	34,826
15°	1,63	1,027	10,044	23,511	20,618	29,375	10,309	29,375	3,863	7,727	38,462	32,864
15°	1,63	1,158	10,770	20,111	22,106	25,127	11,053	25,127	3,846	7,693	35,714	38,251
15°	1,63	1,288	6,888	41,219	14,139	51,501	7,069	51,501	3,827	7,654	55,556	18,568
15°	1,63	1,418	0,758	169,523	1,556	211,809	0,778	211,809	3,791	8,477	500,000	5,001
15°	1,62	1,548	0,000	332,516	0,000	415,460	0,000	415,460	3,759	16,627		5,000
15°	2,3	0,795	5,363	24,518	11,009	30,634	5,505	30,634	3,831	7,662	71,429	31,250

15°	2,3	0,925	3,188	24,739	6,544	30,909	3,272	30,909	3,826	7,651	120,000	30,928
15°	2,3	1,055	4,873	25,906	10,003	32,368	5,002	32,368	3,847	7,695	78,947	29,703
15°	2,3	1,186	5,002	25,393	10,267	31,727	5,133	31,727	3,847	7,695	76,923	30,303
15°	2,31	1,316	2,799	70,495	5,746	88,079	2,873	88,079	3,817	7,635	136,364	10,831
15°	2,3	1,446	-0,127	153,207	-0,260	191,423	-0,130	191,423	3,799	7,661	-3000,000	5,001
30°	0,3	0,697	10,953	19,559	22,483	24,438	11,242	24,438	3,912	7,824	35,715	40,000
30°	0,3	0,827	18,506	14,760	37,986	18,442	18,993	18,442	3,855	7,711	20,834	52,239
30°	0,3	0,957	18,372	10,936	37,711	13,664	18,856	13,664	3,828	7,655	20,834	70,000
30°	0,3	1,088	17,580	14,850	36,085	18,554	18,042	18,554	3,822	7,643	21,739	51,471
30°	0,3	1,218	7,599	45,270	15,599	56,563	7,799	56,563	3,800	7,599	50,000	16,787
30°	0,3	1,348	1,510	128,144	3,100	160,108	1,550	160,108	3,775	7,551	250,000	5,893
30°	0,3	1,479	0,752	319,413	1,543	399,088	0,772	399,088	3,759	15,972	500,000	5,000
30°	0,5	0,710	10,851	14,726	22,272	18,399	11,136	18,399	3,875	7,750	35,714	52,632
30°	0,5	0,840	12,370	21,063	25,392	26,317	12,696	26,317	3,901	7,801	31,532	37,037
30°	0,5	0,970	15,127	12,277	31,050	15,339	15,525	15,339	3,836	7,673	25,363	62,500
30°	0,5	1,101	15,706	9,162	32,239	11,447	16,119	11,447	3,817	7,635	24,306	83,333
30°	0,5	1,231	13,316	23,685	27,333	29,593	13,666	29,593	3,820	7,640	28,689	32,258
30°	0,49	1,361	2,491	105,376	5,113	131,661	2,556	131,661	3,790	7,581	152,174	7,195
30°	0,49	1,492	0,108	228,848	0,221	285,933	0,110	285,933	3,764	11,444	3500,000	5,000
30°	0,75	0,725	10,882	15,546	22,337	19,423	11,168	19,423	3,886	7,773	35,714	50,000
30°	0,75	0,855	11,010	21,019	22,600	26,262	11,300	26,262	3,892	7,785	35,354	37,037
30°	0,75	0,985	11,114	18,672	22,814	23,330	11,407	23,330	3,890	7,780	35,000	41,667
30°	0,75	1,116	14,185	11,546	29,117	14,426	14,558	14,426	3,849	7,697	27,132	66,667
30°	0,75	1,246	11,826	19,746	24,275	24,672	12,137	24,672	3,797	7,595	32,110	38,462
30°	0,75	1,376	2,809	95,300	5,766	119,071	2,883	119,071	3,782	7,564	134,615	7,937
30°	0,75	1,507	0,645	200,222	1,324	250,166	0,662	250,166	3,764	10,012	583,333	5,000
30°	1,1	0,743	8,550	16,323	17,550	20,394	8,775	20,394	3,886	7,773	45,455	47,619
30°	1,1	0,873	10,117	21,790	20,766	27,225	10,383	27,225	3,891	7,782	38,462	35,714
30°	1,1	1,004	10,063	21,675	20,657	27,082	10,328	27,082	3,871	7,741	38,462	35,714
30°	1,1	1,134	11,559	13,871	23,726	17,331	11,863	17,331	3,853	7,706	33,333	55,556
30°	1,1	1,264	10,663	15,995	21,888	19,985	10,944	19,985	3,808	7,617	35,714	47,619
30°	1,1	1,395	2,264	86,773	4,646	108,418	2,323	108,418	3,773	7,546	166,667	8,696
30°	1,1	1,525	0,751	185,550	1,542	231,833	0,771	231,833	3,756	7,513	500,000	4,049
30°	1,61	0,766	7,723	21,625	15,853	27,020	7,927	27,020	3,862	7,723	50,000	35,714
30°	1,61	0,896	7,713	23,910	15,832	29,875	7,916	29,875	3,857	7,713	50,000	32,258

30°	1,61	1,027	8,455	23,827	17,355	29,771	8,677	29,771	3,843	7,686	45,455	32,258
30°	1,61	1,157	9,172	17,580	18,827	21,965	9,413	21,965	3,822	7,643	41,667	43,478
30°	1,61	1,288	5,321	27,363	10,921	34,189	5,461	34,189	3,800	7,601	71,429	27,778
30°	1,61	1,418	2,266	73,270	4,651	91,546	2,326	91,546	3,777	7,554	166,667	10,310
30°	2,3	0,795	6,152	26,913	12,627	33,626	6,313	33,626	3,845	7,689	62,500	28,572
30°	2,3	0,925	6,920	27,682	14,205	34,587	7,103	34,587	3,845	7,689	55,556	27,778
30°	2,3	1,055	6,916	26,125	14,195	32,642	7,098	32,642	3,842	7,684	55,556	29,412
30°	2,3	1,186	6,104	19,836	12,528	24,784	6,264	24,784	3,815	7,629	62,500	38,462
30°	2,3	1,316	4,549	29,566	9,337	36,941	4,668	36,941	3,790	7,581	83,333	25,641
45°	0,3	0,697	15,762	18,126	32,354	22,648	16,177	22,648	3,941	7,881	25,000	43,478
45°	0,3	0,827	19,372	16,866	39,763	21,073	19,882	21,073	3,855	7,710	19,901	45,714
45°	0,29	0,957	18,734	10,622	38,454	13,272	19,227	13,272	3,863	7,725	20,619	72,727
45°	0,29	1,087	21,114	10,509	43,340	13,130	21,670	13,130	3,856	7,713	18,265	73,395
45°	0,29	1,218	12,580	12,580	25,822	15,717	12,911	15,717	3,812	7,624	30,303	60,606
45°	0,29	1,348	8,842	15,498	18,151	19,364	9,075	19,364	3,803	7,606	43,011	49,080
45°	0,29	1,479	2,824	46,125	5,797	57,630	2,898	57,630	3,765	7,531	133,333	16,327
45°	0,29	1,609	0,657	165,390	1,349	206,645	0,675	206,645	3,757	8,270	571,429	5,000
45°	0,51	0,710	13,398	14,974	27,501	18,709	13,750	18,709	3,941	7,881	29,412	52,632
45°	0,51	0,840	13,457	19,645	27,622	24,545	13,811	24,545	3,929	7,858	29,197	40,000
45°	0,51	0,970	14,930	17,063	30,647	21,319	15,323	21,319	3,878	7,756	25,974	45,455
45°	0,5	1,101	15,589	7,651	31,999	9,560	16,000	9,560	3,826	7,651	24,540	100,000
45°	0,5	1,231	10,977	6,056	22,532	7,567	11,266	7,567	3,785	7,570	34,483	125,000
45°	0,5	1,361	7,251	9,793	14,883	12,236	7,442	12,236	3,767	7,533	51,948	76,923
45°	0,5	1,492	3,576	28,606	7,340	35,742	3,670	35,742	3,764	7,528	105,263	26,316
45°	0,5	1,622	0,656	92,206	1,346	115,206	0,673	115,206	3,748	7,497	571,429	8,130
45°	0,75	0,725	10,156	15,625	20,847	19,522	10,423	19,522	3,906	7,812	38,462	50,000
45°	0,75	0,855	10,260	20,325	21,061	25,395	10,530	25,395	3,909	7,817	38,095	38,462
45°	0,75	0,985	11,886	20,264	24,397	25,319	12,199	25,319	3,897	7,794	32,787	38,462
45°	0,75	1,116	11,819	11,531	24,261	14,407	12,130	14,407	3,844	7,687	32,520	66,667
45°	0,75	1,246	10,245	8,348	21,030	10,430	10,515	10,430	3,795	7,589	37,037	90,909
45°	0,75	1,376	5,750	12,819	11,802	16,016	5,901	16,016	3,770	7,540	65,574	58,824
45°	0,75	1,507	2,046	32,739	4,200	40,905	2,100	40,905	3,720	7,441	181,818	22,727
45°	0,75	1,637	0,651	73,605	1,335	91,965	0,668	91,965	3,717	7,435	571,429	10,101
45°	1,11	0,743	8,550	18,655	17,550	23,308	8,775	23,308	3,886	7,773	45,455	41,667
45°	1,11	0,873	9,314	23,285	19,118	29,093	9,559	29,093	3,881	7,762	41,667	33,334

45°	1,1	1,004	9,287	23,218	19,063	29,009	9,532	29,009	3,870	7,739	41,667	33,334
45°	1,1	1,134	9,247	16,182	18,981	20,219	9,491	20,219	3,853	7,706	41,667	47,619
45°	1,1	1,264	7,602	11,404	15,605	14,248	7,803	14,248	3,801	7,602	50,000	66,667
45°	1,1	1,395	3,753	15,764	7,705	19,697	3,852	19,697	3,753	7,507	100,000	47,619
45°	1,61	0,766	6,975	20,926	14,318	26,146	7,159	26,146	3,875	7,750	55,556	37,037
45°	1,61	0,896	6,944	25,462	14,254	31,814	7,127	31,814	3,858	7,716	55,556	30,303
45°	1,61	1,027	7,704	24,652	15,813	30,801	7,907	30,801	3,852	7,704	50,000	31,250
45°	1,61	1,157	7,675	19,955	15,754	24,933	7,877	24,933	3,838	7,675	50,000	38,462
45°	1,6	1,287	5,338	22,113	10,956	27,629	5,478	27,629	3,813	7,625	71,429	34,483
45°	2,3	0,795	5,386	27,702	11,056	34,612	5,528	34,612	3,847	7,695	71,429	27,778
45°	2,3	0,925	6,133	30,665	12,589	38,315	6,295	38,315	3,833	7,666	62,500	25,000
45°	2,3	1,055	5,362	28,341	11,006	35,411	5,503	35,411	3,830	7,660	71,429	27,027
45°	2,3	1,186	5,346	24,438	10,973	30,534	5,487	30,534	3,818	7,637	71,429	31,250
45°	2,3	1,316	3,804	33,479	7,809	41,830	3,905	41,830	3,804	7,609	100,000	22,727
60°	0,29	0,696	14,011	19,460	28,760	24,314	14,380	24,314	3,892	7,784	27,778	40,000
60°	0,29	0,827	17,052	17,149	35,003	21,427	17,501	21,427	3,876	7,751	22,728	45,198
60°	0,29	0,957	16,908	9,414	34,705	11,763	17,353	11,763	3,843	7,685	22,727	81,633
60°	0,29	1,087	15,263	11,733	31,329	14,660	15,665	14,660	3,816	7,631	25,000	65,041
60°	0,29	1,218	6,840	23,939	14,040	29,911	7,020	29,911	3,800	7,600	55,556	31,746
60°	0,29	1,348	3,017	41,951	6,192	52,415	3,096	52,415	3,771	7,542	125,000	17,978
60°	0,29	1,479	0,751	59,899	1,542	74,840	0,771	74,840	3,755	7,511	500,000	12,539
60°	0,29	1,609	0,000	104,022	0,000	129,970	0,000	129,970	4,005	8,011		7,701
60°	0,5	0,710	10,866	15,523	22,305	19,395	11,152	19,395	3,881	7,762	35,714	50,000
60°	0,51	0,840	12,519	20,246	25,697	25,296	12,849	25,296	3,912	7,824	31,250	38,648
60°	0,51	0,970	13,112	15,233	26,914	19,033	13,457	19,033	3,856	7,713	29,412	50,633
60°	0,5	1,101	10,707	10,420	21,977	13,019	10,989	13,019	3,824	7,648	35,714	73,395
60°	0,5	1,231	7,562	14,747	15,523	18,425	7,761	18,425	3,781	7,562	50,000	51,282
60°	0,5	1,361	3,029	31,336	6,218	39,152	3,109	39,152	3,787	7,574	125,000	24,169
60°	0,5	1,492	0,752	52,049	1,543	65,032	0,771	65,032	3,758	7,516	500,000	14,441
60°	0,5	1,622	0,000	74,843	0,000	93,512	0,000	93,512	3,737	7,475	#DIV/0!	9,988
60°	0,76	0,725	10,119	15,568	20,771	19,451	10,386	19,451	3,892	7,784	38,462	50,000
60°	0,76	0,855	10,253	20,350	21,045	25,426	10,523	25,426	3,884	7,767	37,879	38,168
60°	0,76	0,985	8,848	21,267	18,162	26,571	9,081	26,571	3,881	7,762	43,860	36,497
60°	0,76	1,116	8,913	18,134	18,296	22,657	9,148	22,657	3,842	7,684	43,104	42,373
60°	0,76	1,246	6,685	19,600	13,723	24,490	6,861	24,490	3,799	7,597	56,818	38,760

60°	1,11	0,743	9,300	18,601	19,091	23,241	9,545	23,241	3,875	7,750	41,667	41,667
60°	1,11	0,873	8,386	22,518	17,214	28,135	8,607	28,135	3,882	7,765	46,296	34,483
60°	1,11	1,004	8,199	23,204	16,829	28,992	8,415	28,992	3,867	7,735	47,170	33,334
60°	1,11	1,134	7,990	21,512	16,401	26,878	8,200	26,878	3,841	7,683	48,077	35,714
60°	1,11	1,265	5,495	30,526	11,279	38,141	5,639	38,141	3,816	7,632	69,445	25,000
60°	1,61	0,766	6,955	22,411	14,277	28,002	7,138	28,002	3,864	7,728	55,556	34,483
60°	1,6	0,896	6,950	27,029	14,267	33,771	7,133	33,771	3,861	7,723	55,556	28,572
60°	1,6	1,027	6,935	27,741	14,236	34,661	7,118	34,661	3,853	7,706	55,556	27,778
60°	1,6	1,157	6,134	27,603	12,591	34,488	6,295	34,488	3,834	7,668	62,500	27,778
60°	2,3	0,795	4,597	29,882	9,436	37,336	4,718	37,336	3,831	7,662	83,333	25,641
60°	2,3	0,925	5,375	33,017	11,033	41,253	5,516	41,253	3,839	7,678	71,429	23,256
60°	2,3	1,055	4,594	29,861	9,430	37,309	4,715	37,309	3,828	7,657	83,333	25,641
60°	2,3	1,186	4,584	34,381	9,410	42,957	4,705	42,957	3,820	7,640	83,333	22,222

M.2 táblázat. Mért és számított értékek.