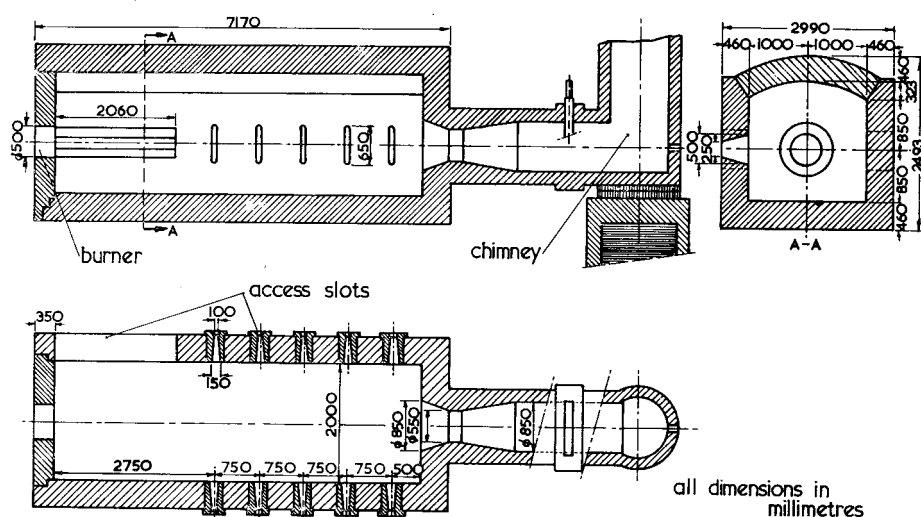
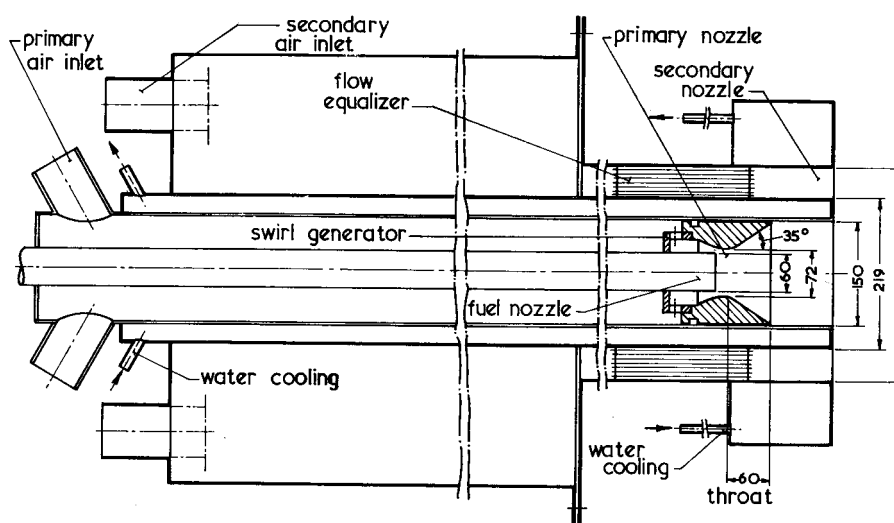


4.2. HORIZONTALNO LOŽIŠTE

Rezultati mjerenja na horizontalnom eksperimentalnom ložištu u IJmuidenu opširno su prikazani u [3]. Ložište je u obliku horizontalno položenog kvadra, sl. 4.2, s blago zaobljenim stropom, dimenzija $6.25 \times 2.0 \times 2.023 \text{ m}^3$, s vrtložnim plamenikom prema slici 4.3. Uspoređeni su podaci pri izgaranju plinskog goriva, čiji je sastav dan u tablici 4.3. Prilikom modeliranja udio propana i butana u gorivu je pridodan etanu, što je zbog vrlo malog udjela tih ugljikovodika u gorivu zanemariva greška. Gorivo, zajedno s jednim dijelom zraka ulazi na primar vrtložnog gorionika, a ostatak zraka ulazi na sekundar i služi kao stabilizirajuća struja. Podaci su dani u tablici 4.4. Ovakav je gorionik vrlo teško modelirati, ne samo zbog komplicirane geometrije i zbog vrtloga, nego i zbog nekoliko različitih mehanizama izgaranja koje se ovdje pojavljuju. U području primarne struje nalazi se predmiješana smjesa s podstehiometrijskom količinom kisika, dakle kinetički plamen. Na granici primara i sekundara zrak se dovodi difuzijom, pa je prema tome plamen vođen tih mehanizmom.



Slika 4.2. Presjek eksperimentalnog ložišta, IJmuiden [3]



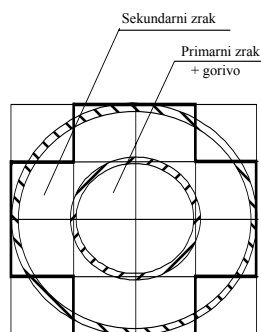
Slika 4.3. Presjek vrtložnog gorionika [3]

Mjerenja temperature te udjela nekih kemijskih vrsta izvršena su u horizontalnoj ravnini u visini plamenika na 113 mjernih mjesta. Da bi se dobila distribucija veličina po čitavom presjeku ložišta, vrijednosti su u ostalim točkama interpolirane, što je moglo utjecati na kvalitetu slike u područjima u kojima je broj mjernih točaka bio značajno manji.

Tablica 4.3. Sastav plinskog goriva

| sastav | mjereno [m ³ /m ³] | modelirano [m ³ /m ³] |
|--------------------------------|--|---|
| CH ₄ | 0.8130 | 0.8130 |
| C ₂ H ₆ | 0.0285 | 0.0339 |
| C ₃ H ₈ | 0.0040 | |
| C ₄ H ₁₀ | 0.0014 | |
| N ₂ | 0.1435 | 0.1435 |
| CO ₂ | 0.0089 | 0.0089 |

Kako bi se simulirao vrtlog primarne struje goriva i zraka gorionika koji se ispravlja normalno usmjerenom strujom sekundarnog zraka, presjek gorionika je podijeljen na 12 kontrolnih površina (4-primar, 8-sekudar) kao što je prikazano na slici 4.4. Odabrani broj kontrolnih površina je premali da bi se vjerno simulirao vrtložni plamenik (sl. 4.3), ali je zbog ograničenja na snazi računala (po CPU vremenu) taj broj bio uzet kao najbolji kompromis. To će dovesti do filtriranja ekstrema (usrednjavanja) i gubitka jednog dijela informacije u području visokih gradijenata, što može imati značajan utjecaj na model izgaranja koji je vrlo senzitiv u odnosu na mikropojave. Međutim, kako pokazuju rezultati, odabrana je mreža zadovoljavajuća.



Slika 4.4. Podjela presjeka gorionika na kontrolne površine

Mjerenja distribucija temperature u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika prikazana je na slici 4.5. Na prvi se pogled primjećuje nesimetričnost slike. To je posljedica vrtloga u primarnoj struji, koji iako pod utjecajem izravnavajuće sekundarne struje ipak izaziva rotacionu komponentu po čitavom ložištu. Na slici 4.6 prikazana je distribucija temperature izračunata modelom opisanim u ovome radu. Na slici 4.7 uspoređene su mjerena i računata temperatura uzduž osi gorionika. Slaganje je prilično dobro s obzirom na grubost mreže. U području gorionika očituje se veća uprosječenost temperatura, što onda odvođa do kasnijeg zapaljenja smjese, ali i nešto naglijeg hlađenja.

Slike 4.8 i 4.9 prikazuju respektivno mjerenu i računatu distribuciju metana u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika, a slika 4.10 uspoređuje mjereni i računati maseni udio metana uzduž osi gorionika. Slaganje je vrlo dobro, osim što je mjereni maseni udio metana na 0.37 m od gorionika veći od udjela u primarnoj struji gorionika, što je sasvim nevjerojatni podatak i vjerojatno je posljedica greške u mjerenju.

Tablica 4.4. Podaci o gorioniku

| ulaz | gorivo | | | zrak | | |
|----------|------------------|-----------|----------|------------------|-----------|----------|
| | \dot{m} [kg/s] | u [m/s] | t [°C] | \dot{m} [kg/s] | u [m/s] | t [°C] |
| primar | 0.0461 | 50 | 15 | 0.1205 | 85.0 | 25 |
| sekundar | - | - | - | 0.5125 | 11.7 | 47 |

Slike 4.11 i 4.12 prikazuju respektivno mjerenu i računatu distribuciju kisika u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika, a slika 4.13 uspoređuje mjereni i računati maseni udio kisika uzduž osi gorionika. Iako je vizualni efekt slaganja distribucija dobar, usporedba uzduž osi gorionika prikazuje značajno kasniji pad udjela kisika. To se može kao i kod temperature objasniti kasnijim paljenjem smjese u primaru. Na slici 4.11 očito je vrlo nagli pad masenog udjela kisika u struji primara, gotovo odmah nakon izlaska smjese iz gorionika, dok se taj mehanizam u struji računatog primara pojavljuje tek kasnije.

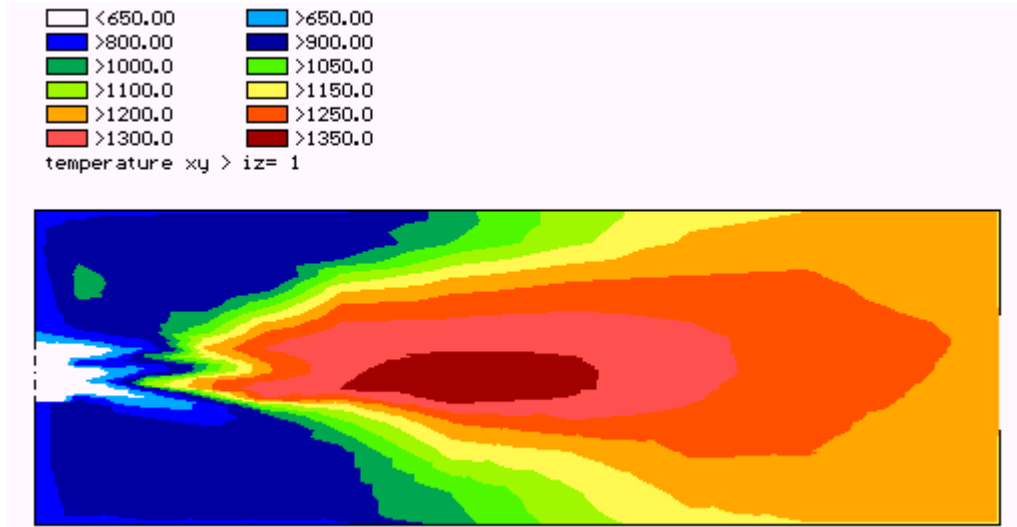
Slike 4.14 i 4.15 prikazuju respektivno mjerenu i računatu distribuciju ugljik (IV) oksida u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika, a slika 4.16 uspoređuje mjereni i računati maseni udio ugljik (IV) oksida uzduž osi gorionika. Prikazane distribucije masenih udjela daju dobar vizualni efekt slaganja.

Slike 4.17 i 4.18 prikazuju respektivno mjerenu i računatu distribuciju ugljik (II) oksida u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika, a slika 4.19 uspoređuje mjereni i računati maseni udio ugljik (II) oksida uzduž osi gorionika. Distribucije se vrlo dobro slažu, osim što u centru plamena model ne može uhvatiti nagli uspon i pad masenog udjela, što se vidi na usporedbenom dijagramu u osi gorionika.

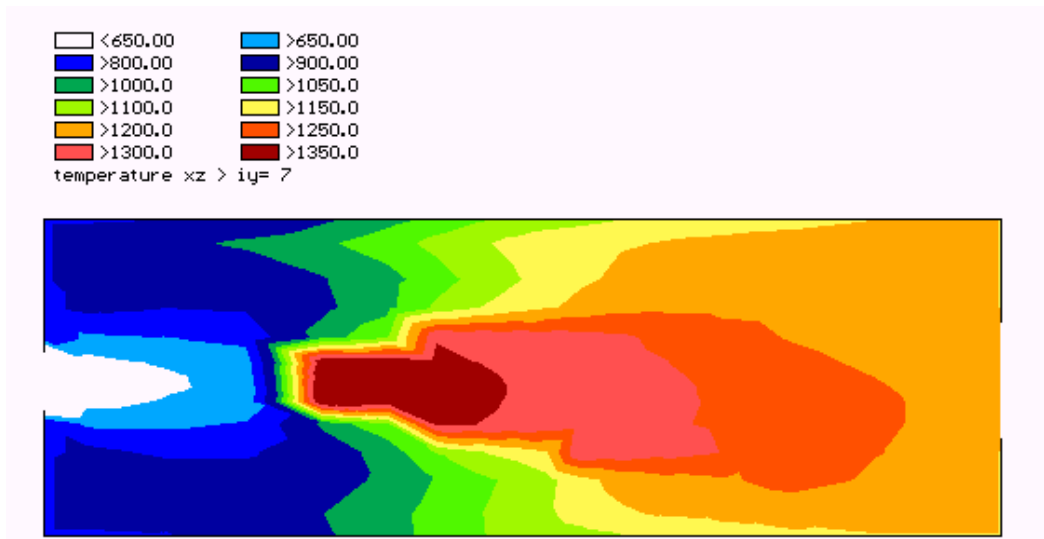
Slike 4.20 i 4.21 prikazuju respektivno mjerenu i računatu distribuciju radikala C_2H_4 u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika, a slika 4.22 uspoređuje mjereni i računati maseni udio tog radikala uzduž osi gorionika. Distribucije se vrlo dobro slažu. Ovaj je radikal značajan za C_2 lanac izgaranja metana, koji je od velike važnosti pri izgaranju smjesa bogatih kisikom, kao što je slučaj u ložištima.

Slika 4.23 prikazuje distribuciju brzina u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika. Uočljiva je zona recirkulacije. Iz te se slike može vidjeti i mreža koja je korištena pri modeliranju. Najgušća mreža je u zoni plamena, koja pri izgaranju plinskog goriva nije uz sam gorionik, nego u središtu ložišta.

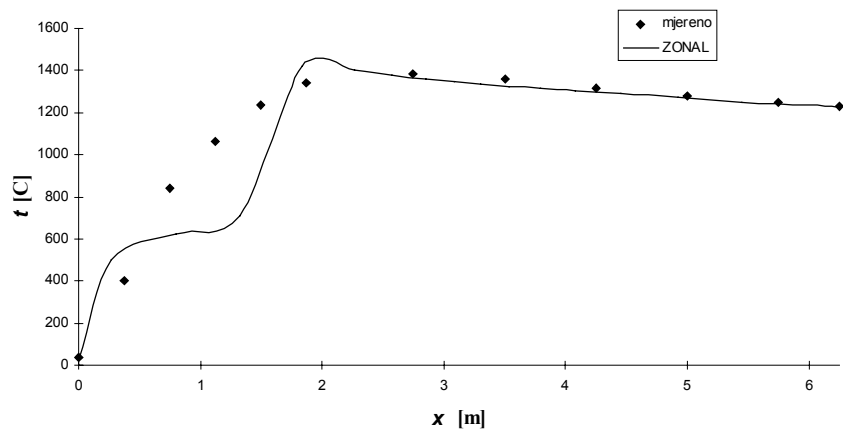
Slika 4.24 prikazuje izračunate distribucije različitih radikala i spojeva koji sudjeluju u procesu izgaranja, redom vode, elementarnog kisika i vodika, vodikovog peroksida, radikala HO_2 , vodika i radikala OH . Uočljivo je da vodikov peroksid i radikal HO_2 postižu maksimalne masene udjele u hladnom dijelu primarne struje, da bi u zoni zapaljenja naglo nestali. Obrnuto, vodik, elementarni kisik i vodik, te hidrosilni radikal imaju vrlo niske masene udjele u hladnoj primarnoj struji, te u zoni plamena naglo postižu maksimum.



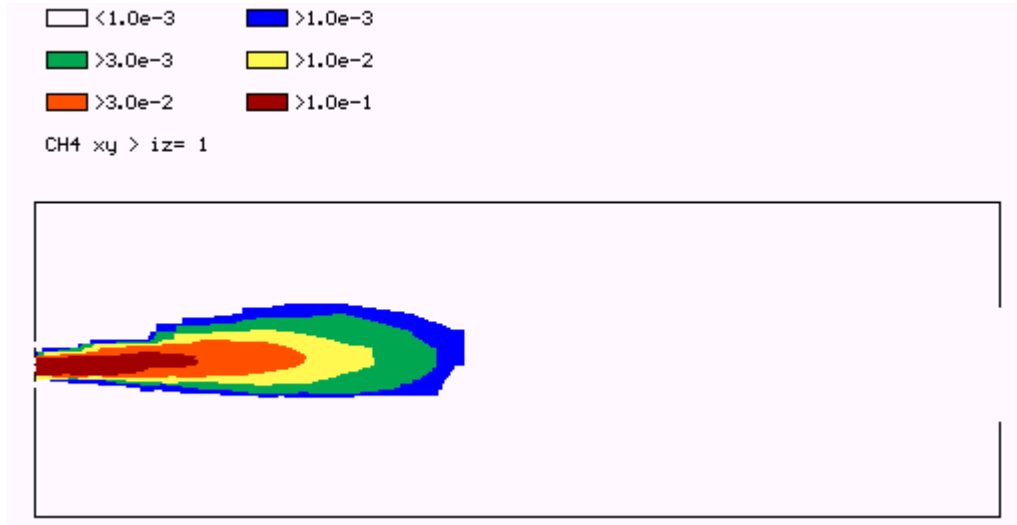
Slika 4.5. Mjerena distribucija temperature u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika



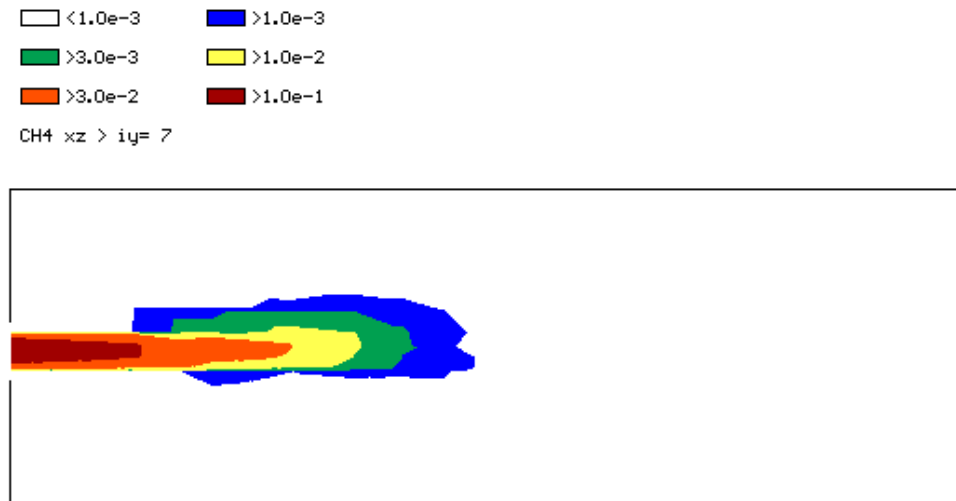
Slika 4.6. Izračunata distribucija temperature u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika



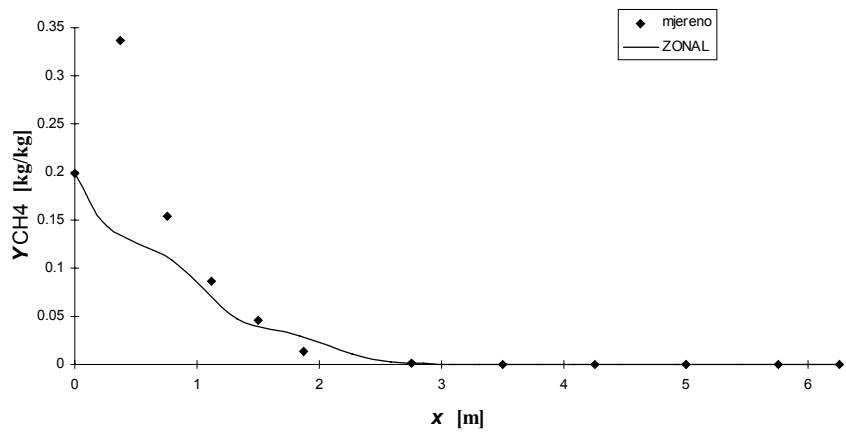
Slika 4.7. Usporedba mjerene i računane temperature u osi gorionika



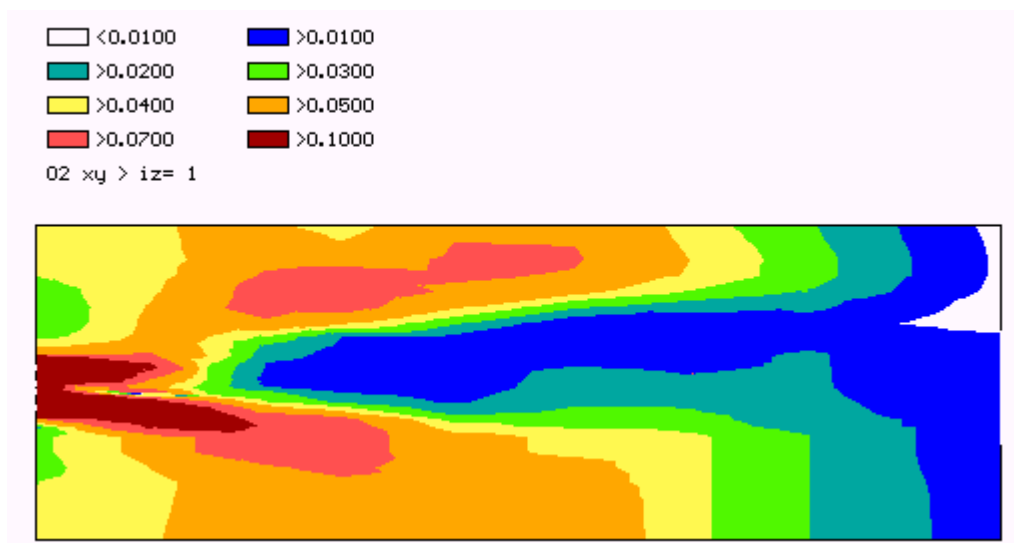
Slika 4.8. Mjerena distribucija metana u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika



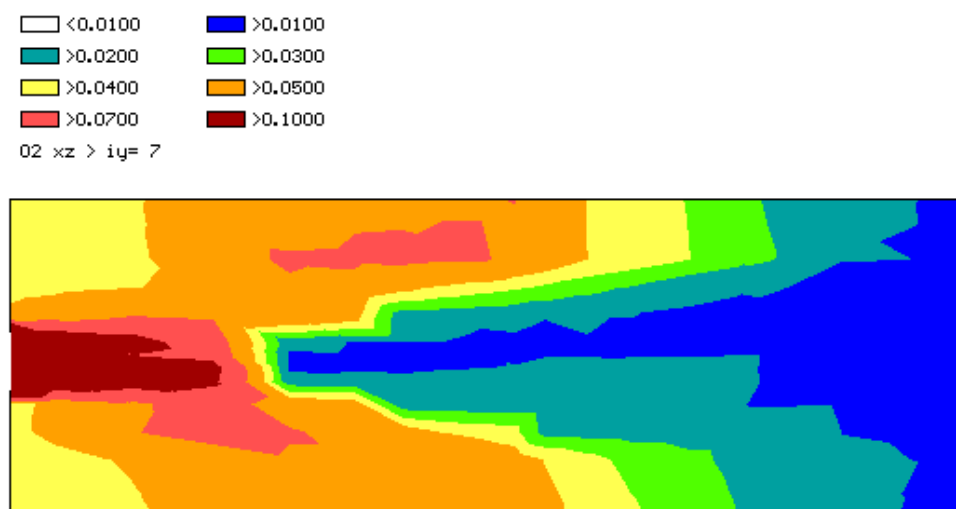
Slika 4.9. Izračunata distribucija metana u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika



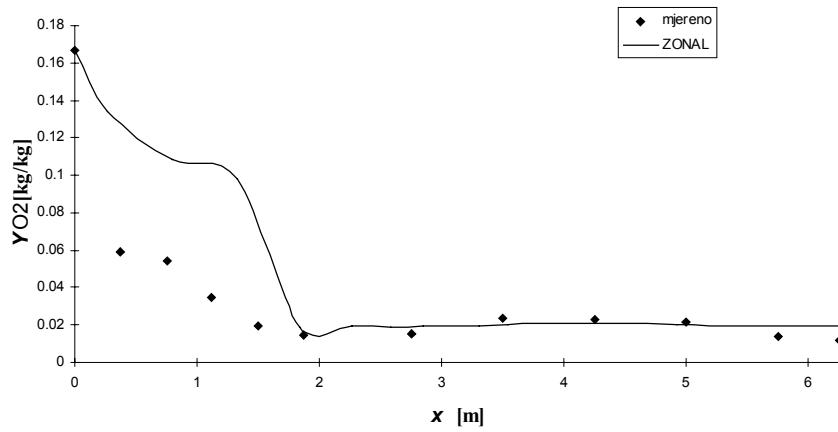
Slika 4.10. Usporedba mjenenog i računatog masenog udjela metana na osi gorionika



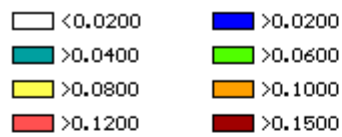
Slika 4.11. Mjerena distribucija kisika u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



Slika 4.12. Izračunata distribucija kisika u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



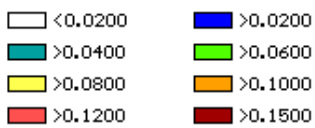
Slika 4.13. Usporedba mjenog i računatog masenog udjela kisika na osi gorionika



C02 xy > iz= 1



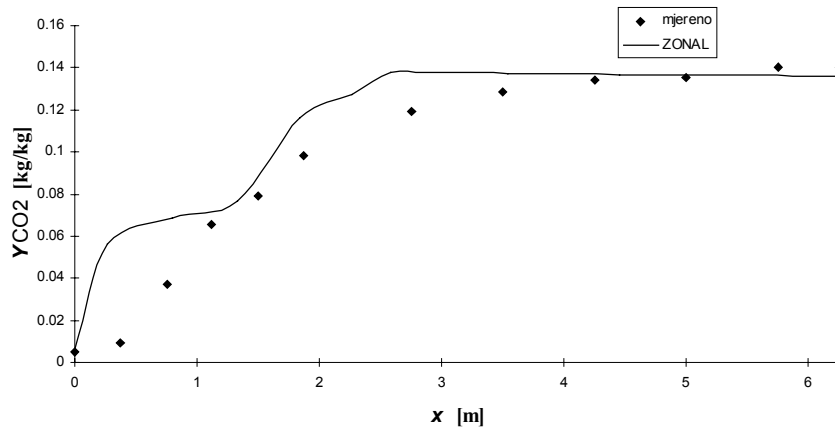
Slika 4.14. Mjerena distribucija ugljik (IV) oksida u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



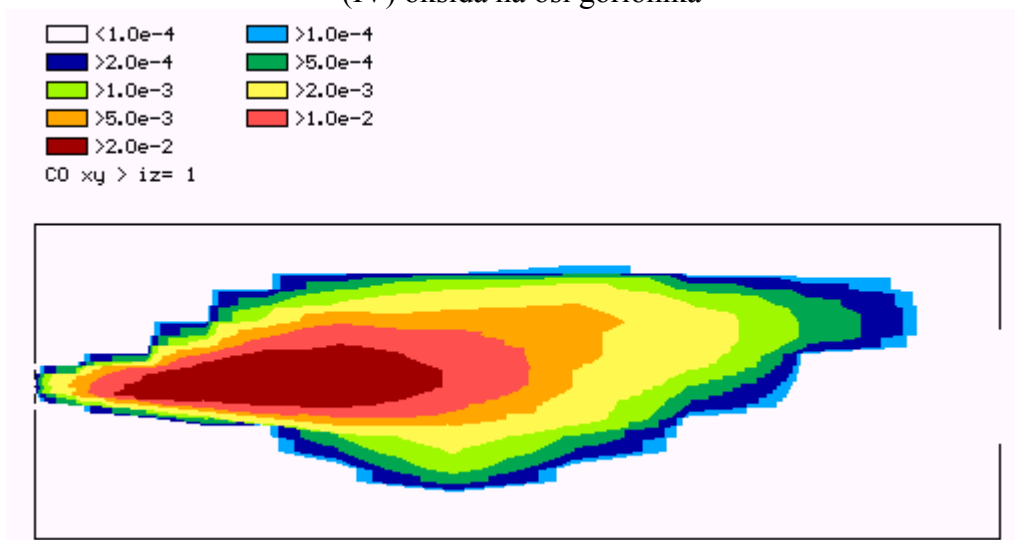
C02 xz > iy= 7



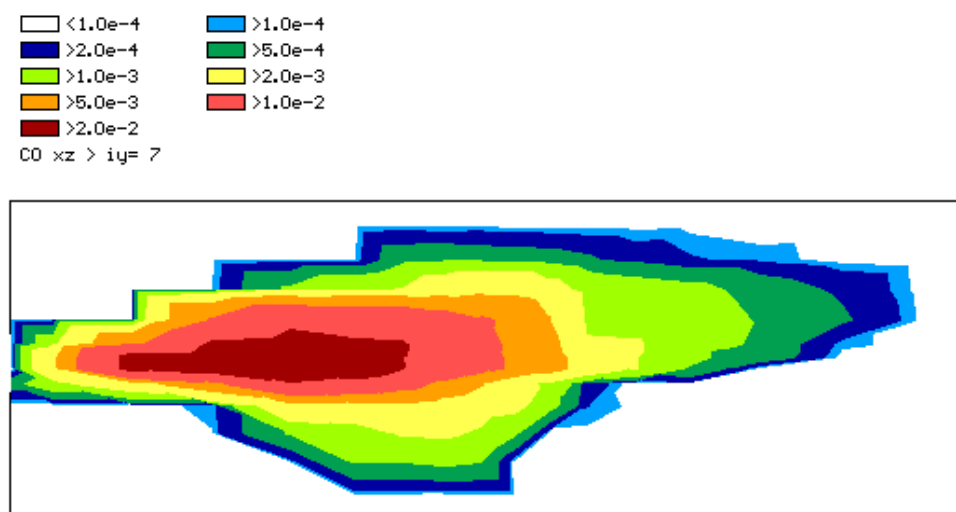
Slika 4.15. Izračunata distribucija ugljik (IV) oksida u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



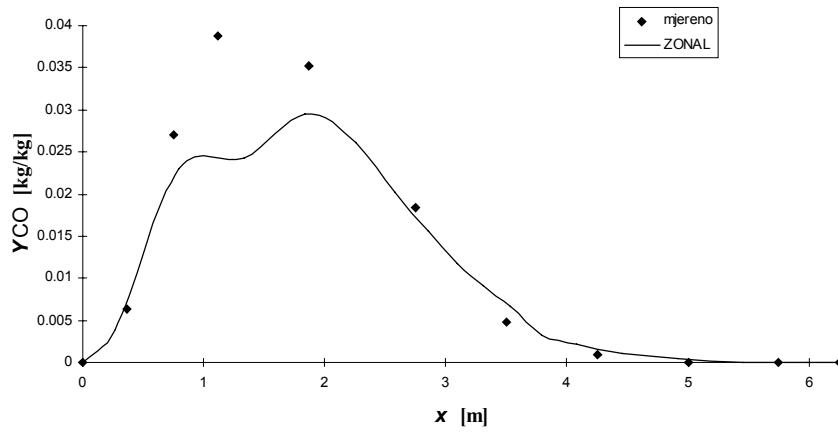
Slika 4.16. Usporedba mjenenog i računatog masenog udjela ugljik (IV) oksida na osi gorionika



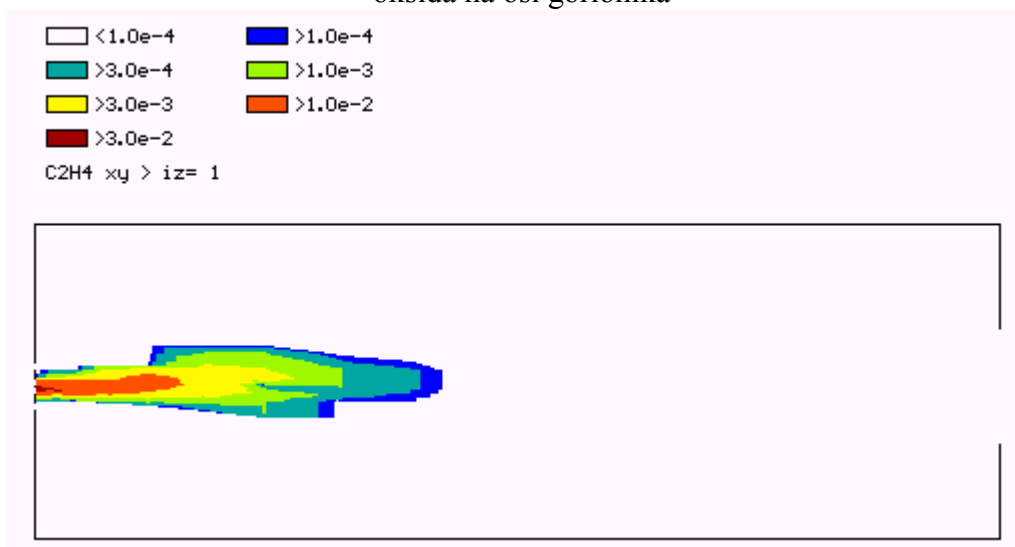
Slika 4.17. Mjerena distribucija ugljik (II) oksida u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika



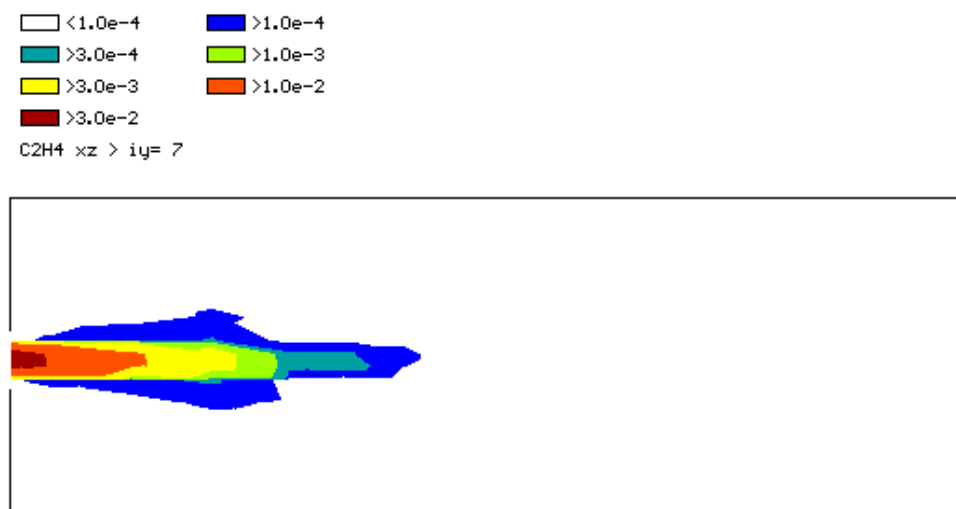
Slika 4.18. Izračunata distribucija ugljik (II) oksida u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika



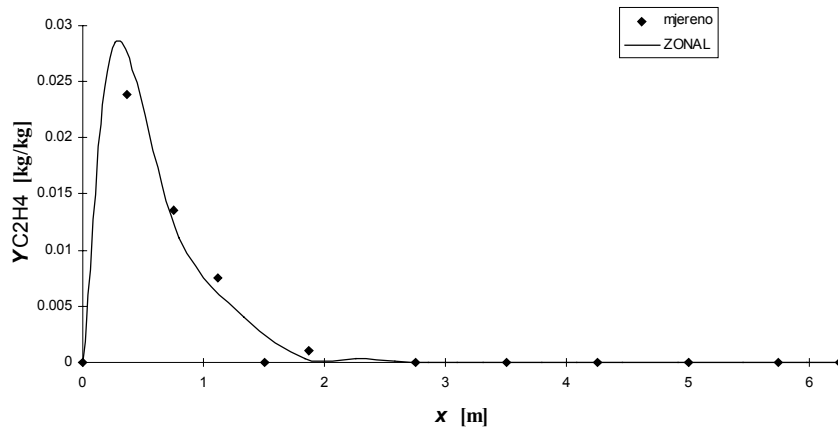
Slika 4.19. Usporedba mjenenog i računatog masenog udjela ugljik (II) oksida na osi gorionika



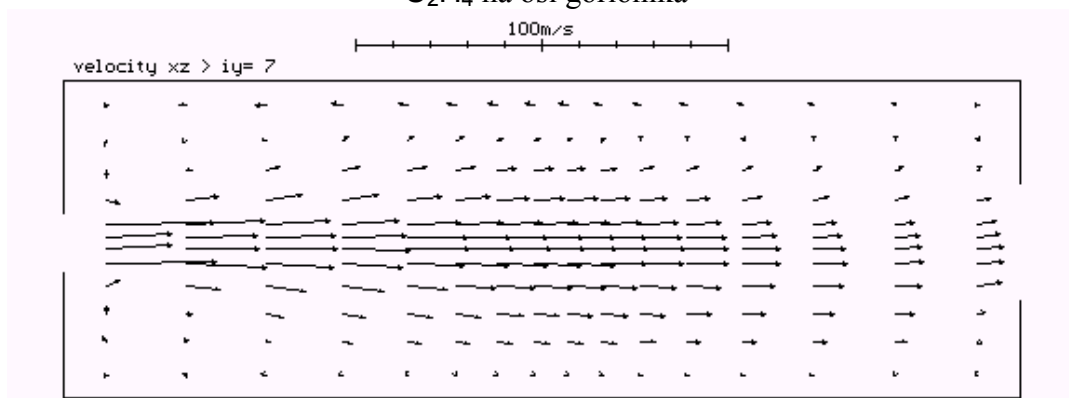
Slika 4.20. Mjerena distribucija radikala C_2H_4 u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



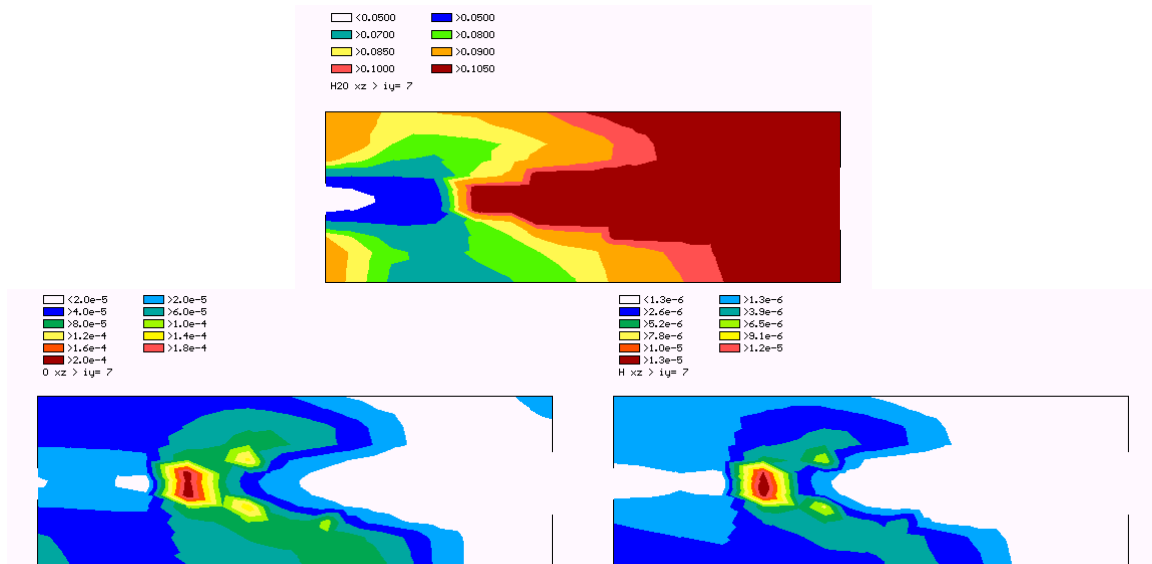
Slika 4.21. Izračunata distribucija radikala C_2H_4 u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika

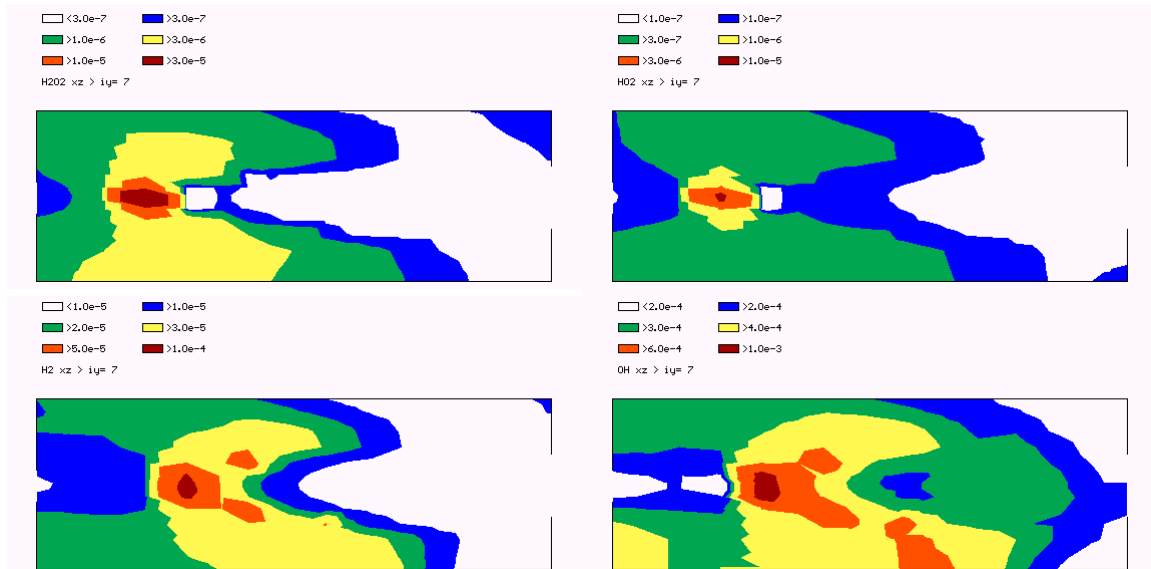


Slika 4.22. Usporedba mjenenog i računatog masenog udjela radikala C_2H_4 na osi gorionika

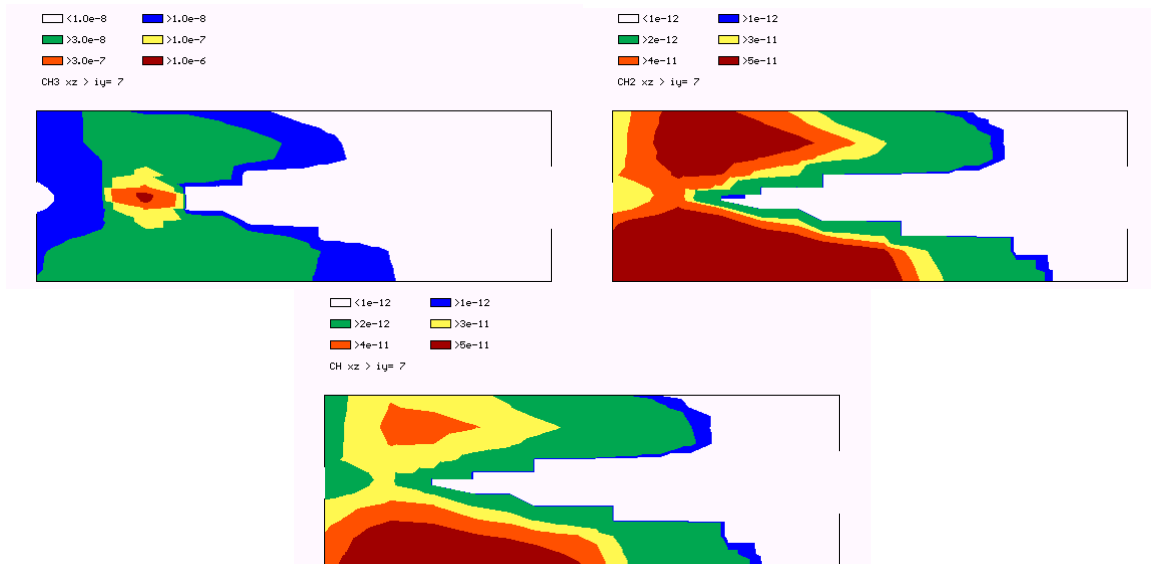


Slika 4.23. Izračunata distribucija brzina u horizontalnoj ravni ložišta u visini gorionika

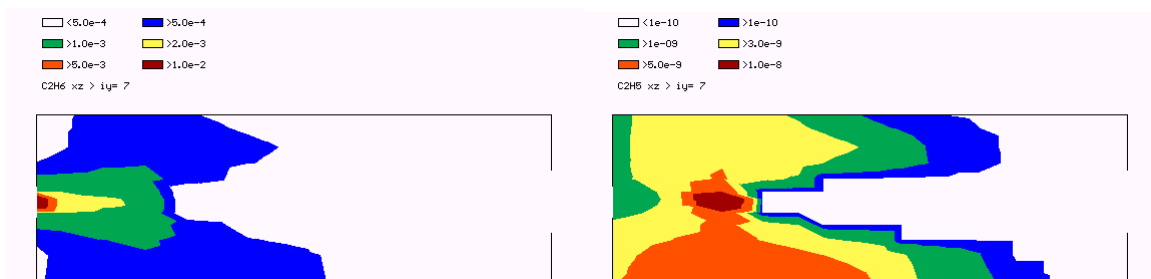


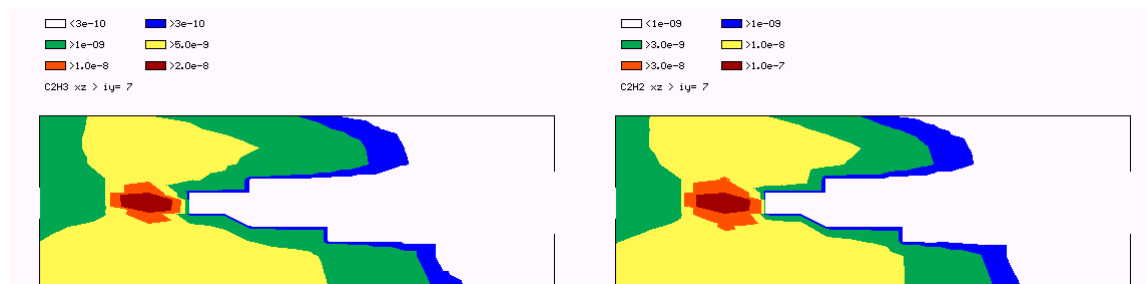


Slika 4.24. Izračunate distribucije spojeva vodikove kemije u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



Slika 4.25. Izračunate distribucije kemijskih vrsta u metilnom lancu u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika



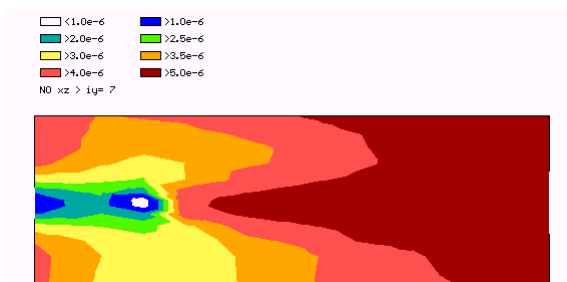


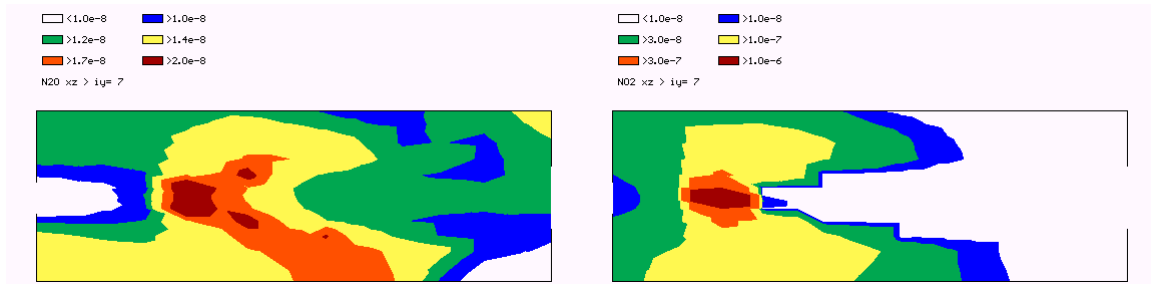
Slika 4.26. Izračunate distribucije kemijskih vrsta u etilnom lancu u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika

Slika 4.25 prikazuje neke od distribucija u C lancu oksidacije metana, redom metilnih radikala CH_3 , CH_2 i CH . Prvi od njih, CH_3 , dostiže maksimalne masene udjele u zoni prije samog plamena, dakle u hladnoj zoni, međutim kako se radi o vrlo niskim masnim udjelima, ovaj je radikal vrlo kratkotrajan, iako preko njega prolaze oba glavna lanca oksidacije metana. Preostala dva radikala su daleko manje značajni u kinetici izgaranja metana, imaju vrlo male masene udjele, te postižu maksimalne udjele na rubnim zonama plamena.

Slika 4.26 prikazuje masene udjele etana te dijela C_2 lanca oksidacije metana, redom radikale C_2H_5 , C_2H_3 i C_2H_2 , dok je distribucija najznačajnijeg radikala tog kinetičkog lanca, C_2H_4 , prikazana na slici 4.21. Etan, kao i metan ulazi u ložište kao dio plinskog goriva u struji primara. Njegov maseni udio opada kroz cijelu hladnu zonu primarne struje, ali tek u području plamena dolazi do naglog reagiranja. Maseni udio etilnog radikala C_2H_5 u kojeg etan prelazi gubitkom jednog atoma vodika, postepeno raste kroz hladnu zonu, da bi pred sam plamen dostigao maksimum. Međutim, maseni udjeli etilnog radikala C_2H_5 su izrazito mali, tako da nikako ne mogu objasniti niti smanjenje udjela etana, niti smanjenje udjela metana (preko C_2 lanca). Na slici 4.21 lijepo se može vidjeti da se masa goriva uglavnom skuplja u radikalu C_2H_4 , u području hladne zone primarne struje. Tek potkraj te hladne zone dolazi do brzog prelaska C_2H_4 u kratkotrajni radikal C_2H_3 , koji gotovo momentalno prelazi u radikal C_2H_2 , i dalje preko više različitih kinetičkih putova u ugljik (II) oksid.

Slika 4.27 prikazuje distribucije dušičnih oksida, redom dušik (II) oksida, dušik (IV) oksida te dušik (I) oksida. Zbog relativno niskih temperatura koje se postižu u ovome ložištu, i maseni udjeli dušičnih oksida su relativno mali, ali se ipak na distribucijama mogu promatrati mehanizmi nastajanja. Dušik (I) oksid dostiže maksimalne masene udjele već u hladnoj zoni pred samom zonom plamena, gdje je zastupljeniji nego sam dušik (II) oksid, da bi se u samoj zoni plamena naglo reducirao u dušik (II) oksid, i na izlasku iz ložišta bio dva reda veličine manje zastupljen od njega. Naprotiv, dušik (II) oksid nastaje uglavnom u području plamena, u području viših temperatura.





Slika 4.27. Izračunate distribucije dušičnih oksida u horizontalnoj ravnini ložišta u visini gorionika

Usporedbom rezultata modela s rezultatima mjerenja na eksperimentalnom ložištu pokazana je u ovome radu kvalitativna i kvantitativna točnost iznesenog pristupa rješavanja modela strujanja u ložištima.

Posebno težak problem kod modeliranja ložišta u IJmuidenu je istovremeno postojanje i kinetičkog i difuznog plamena, prvoga u struji primara, a drugoga na granici između primarne struje smjese goriva i zraka i sekundarne struje zraka. Pokušaj rješavanja jednim od modela plamena opisanih u literaturi, koji su strogo ograničeni na jedan ili drugi plamen doveo bi do iskrivljene slike, uvlačenjem plamena u slučaju primjene nekog od kinetičkih modela, ili daljnjim odmicanjem plamena od gorionika u slučaju primjene nekog od modela difuzivnog plamena. Međutim, primjenom detaljnog kinetičkog modela prikazanog u ovome radu, bilo je moguće obuhvatiti oba mehanizma, te dobiti rezultate usporedljive s mjerenim podacima.