



UNIVERZITET U NIŠU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET



Željko J. Mladenović

**PRIMENA GLOBALNIH MODELA U
ANALIZI FIZIČKIH I HEMIJSKIH PROCESA
U NISKOTEMPERATURNIM PLAZMAMA
NA ATMOSFERSKOM PRITISKU**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 30., став 8. Закона о високом образовању
("Сл. гласник РС", бр. 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 44/2010, 93/2012,
89/2013 и 99/2014)

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности (члан 7. Закона о ауторским и
сродним правима, "Сл. гласник РС", бр. 104/2009, 99/2011 и 119/2012).

**Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе,
осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.**

Niš, 2021.



UNIVERZITET U NIŠU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET



Željko J. Mladenović

**PRIMENA GLOBALNIH MODELA U
ANALIZI FIZIČKIH I HEMIJSKIH PROCESA
U NISKOTEMPERATURNIM PLAZMAMA
NA ATMOSFERSKOM PRITISKU**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2021.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF SCIENCES AND MATHEMATICS



Željko J. Mladenović

**GLOBAL MODELS APPLICATION IN
ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL
PROCESSES IN ATMOSPHERIC PRESSURE
LOW TEMPERATURE PLASMAS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2021.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Др Саша Гоцић, ванредни професор, Универзитет у Нишу, Природно-математички факултет
Наслов:	Примена глобалних модела у анализи физичких и хемијских процеса у нискотемпературним плазмама на атмосферском притиску
Резиме:	Главни циљ истраживања у овој докторској дисертацији представља проучавање физичких и хемијских процеса у нискотемпературним плазмама на атмосферском притиску, формираним у Не или смеши Не/О ₂ , које се налазе у контакту са влажним ваздухом, на основу 0D глобалних модела. Функција расподеле електрона по енергији у апроксимацији два члана и коефицијенти брзине електронских сударних процеса, неопходни за решавање система баланских једначина глобалног модела, добијени су нумеричким решавањем Болцманове кинетичке једначине применом програма BOLSIG+, на основу база пресека LXCat и Quantemol-DB. Анализиран је утицај базе пресека на функцију расподеле и транспортне коефицијенте у моделу роја електрона. У случају RF микро-плазма млаза у смеши Не/О ₂ са одређеним процентом влажног ваздуха, анализиран је утицај концентрације електрона на функцију расподеле електрона по енергији и хемијски састав плазме. За случај импулсног (ns) плазма млаза формираног при мешању плазме хелијума са влажним ваздухом, анализиран је утицај концентрације водене паре на главне канале производње и потрошње ОН радикала и резултати су поређени са резултатима флуидног модела из литературе. Модел је проширен укључивањем прорачуна концентрације и температуре електрона, као и запреминског протока гаса, а верификован моделовањем масеног спектра јона за смешу коју генерише Не плазма млаз у атмосфери влажног ваздуха, у Лабораторији за гасну електронику Института за физику у Београду. Одређена је детаљна кинетика појединих активних честица од интереса за примене у биомедицини и пољопривреди. Анализиран је утицај водене паре на концентрацију и температуру електрона, као и на хемијску кинетику свих укључених врста честица.
Научна област:	Физика
Научна дисциплина:	Физика јонизованих гасова и плазме
Кључне речи:	Нискотемпературна плазма, глобални модел, функција расподеле електрона по енергији, коефицијент брзине, концентрација и температура електрона, хемијска кинетика
УДК:	533.9...15:53.043/044:66-985(043.3)
CERIF класификација:	P240 Гасови, динамика флуида, плазма
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD, associate professor Saša Gocić, University of Niš, Faculty of Sciences and Mathematics
Title:	Global models application in analysis of physical and chemical processes in atmospheric pressure low temperature plasmas
Abstract:	<p>The main goal of research in this dissertation is the studying of physical and chemical processes in atmospheric pressure low temperature plasmas, formed in the mixture of He or He/O₂ with humid air, based on application of 0D global models. Electron energy distribution function in the two term approximation and rate coefficients for electron impact processes, necessary for solving the balance equations of global model, have been calculated by numerical solving of Boltzmann kinetic equation with program BOLSIG+, with cross section data taken from databases LXCat and Quantemol-DB. Using the model of electron swarm, the influence of cross section dataset on distribution function and transport coefficients has been studied. In the case of He/O₂ RF micro-plasma jet with some percent of humid air, the influence of electron concentration on electron energy distribution function and plasma composition has been studied by global model. In the case of pulsed (ns) He plasma jet formed in mixture of plasma with humid air, the influence of water vapor concentration on the main production and destruction channels for OH radical has been analyzed and results have been compared with the results of fluid model in literature. Global model was expanded by including the calculation of electron concentration and temperature, and the term for gas flow. The model has been verified in the procedure of modeling the mass spectrum of ions, for He plasma jet which propagates in humid air, measured in the Laboratory of gaseous electronics, Institute of physics Belgrade. Chemical kinetics of active species, important for application in biomedicine and agriculture, has been studied in detail. The influence of water vapor on electron concentration, electron temperature and chemical kinetics of all included species has been analyzed.</p>
Scientific Field:	Physics
Scientific Discipline:	Physics of ionized gases and plasmas
Key Words:	Low temperature plasma, global model, electron energy distribution function, rate coefficient, electron concentration and temperature, chemical kinetics
UDC:	533.9...15:53.043/044:66-985(043.3)
CERIF Classification:	P240 Gases, fluid dynamics, plasmas
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND



**ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
НИШ**

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	монографска
Тип записа, ТЗ:	текстуални / графички
Врста рада, ВР:	докторска дисертација
Аутор, АУ:	Жељко Младеновић
Ментор, МН:	Саша Гоцић
Наслов рада, НР:	ПРИМЕНА ГЛОБАЛНИХ МОДЕЛА У АНАЛИЗИ ФИЗИЧКИХ И ХЕМИЈСКИХ ПРОЦЕСА У НИСКОТЕМПЕРАТУРНИМ ПЛАЗМАМА НА АТМОСФЕРСКОМ ПРИТИСКУ
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	енглески
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	Србија
Година, ГО:	2021.
Издавач, ИЗ:	ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Ниш, Вишеградска 33.
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	10 поглавља, 243 страна, 198 цитата, 13 табела, 120 слика, 1 прилог
Научна област, НО:	физика
Научна дисциплина, НД:	физика јонизованих гасова и плазме
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Нискотемпературна плазма, глобални модел, функција расподеле електрона по енергији, коефицијент брзине, концентрација и температура електрона, хемијска кинетика
УДК	533.9...15:53.043/044:66-985(043.3)
Чува се, ЧУ:	библиотека
Важна напомена, ВН:	

Извод, ИЗ:

Главни циљ истраживања у овој докторској дисертацији представља проучавање физичких и хемијских процеса у нискотемпературним плазмама на атмосферском притиску, формираним у He или смеши He/O₂, које се налазе у контакту са влажним ваздухом, на основу 0D глобалних модела. Функција расподеле електрона по енергији у апроксимацији два члана и коефицијенти брзине електронских сударних процеса, неопходни за решавање система баланских једначина глобалног модела, добијени су нумеричким решавањем Болцманове кинетичке једначине применом програма BOLSIG+, на основу база пресека LXCat и Quantemol-DB. Анализиран је утицај базе пресека на функцију расподеле и транспортне коефицијенте у моделу роја електрона. У случају RF микро-плазма млаза у смеши He/O₂ са одређеним процентом влажног ваздуха, анализиран је утицај концентрације електрона на функцију расподеле електрона по енергији и хемијски састав плазме. За случај импулсног (ns) плазма млаза формираног при мешању плазме хелијума са влажним ваздухом, анализиран је утицај концентрације водене паре на главне канале производње и потрошње OH радикала и резултати су поређени са резултатима флуидног модела из литературе. Модел је проширен укључивањем прорачуна концентрације и температуре електрона, као и запреминског протока гаса, а верификован моделовањем масеног спектра јона за смешу коју генерише He плазма млаз у атмосфери влажног ваздуха, у Лабораторији за гасну електронику Института за физику у Београду. Одређена је детаљна кинетика појединих активних честица од интереса за примене у биомедицини и пољопривреди. Анализиран је утицај водене паре на концентрацију и температуру електрона, као и на хемијску кинетику свих укључених врста честица.

Датум прихватања теме, ДП:

21.12.2020.

Датум одбране, ДО:

Чланови комисије, КО:

Председник:

Члан:

Члан, ментор:

Образац Q4.09.13 - Издање 1



**ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
НИШ**

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	monograph
Type of record, TR :	textual / graphic
Contents code, CC :	doctoral dissertation
Author, AU :	Željko Mladenović
Mentor, MN :	Saša Gocić
Title, TI :	GLOBAL MODELS APPLICATION IN ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES IN ATMOSPHERIC PRESSURE LOW TEMPERATURE PLASMAS
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Serbia
Publication year, PY :	2021
Publisher, PB :	author's reprint
Publication place, PP :	Niš, Višegradska 33.
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	10 chapters, 243 pages, 198 references, 13 tables, 120 figures, 1 appendix
Scientific field, SF :	physics
Scientific discipline, SD :	physics of ionized gases and plasmas
Subject/Key words, S/KW :	Low temperature plasma, global model, electron energy distribution function, rate coefficient, electron concentration and temperature, chemical kinetics
UC	533.9...15:53.043/044:66-985(043.3)
Holding data, HD :	library
Note, N :	

Abstract, AB :	<p>The main goal of research in this dissertation is the studying of physical and chemical processes in atmospheric pressure low temperature plasmas, formed in the mixture of He or He/O₂ with humid air, based on application of 0D global models. Electron energy distribution function in the two term approximation and rate coefficients for electron impact processes, necessary for solving the balance equations of global model, have been calculated by numerical solving of Boltzmann kinetic equation with program BOLSIG+, with cross section data taken from databases LXCat and Quantemol-DB. Using the model of electron swarm, the influence of cross section dataset on distribution function and transport coefficients has been studied. In the case of He/O₂ RF microplasma jet with some percent of humid air, the influence of electron concentration on electron energy distribution function and plasma composition has been studied by global model. In the case of pulsed (ns) He plasma jet formed in mixture of plasma with humid air, the influence of water vapor concentration on the main production and destruction channels for OH radical has been analyzed and results have been compared with the results of fluid model in literature. Global model was expanded by including the calculation of electron concentration and temperature, and the term for gas flow. The model has been verified in the procedure of modeling the mass spectrum of ions, for He plasma jet which propagates in humid air, measured in the Laboratory of gaseous electronics, Institute of physics Belgrade. Chemical kinetics of active species, important for application in biomedicine and agriculture, has been studied in detail. The influence of water vapor on electron concentration, electron temperature and chemical kinetics of all included species has been analyzed.</p>						
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	21.12.2020.						
Defended on, DE :							
Defended Board, DB :	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="400 1272 611 1317">President:</td> <td data-bbox="611 1272 1465 1317"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="400 1317 611 1361">Member:</td> <td data-bbox="611 1317 1465 1361"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="400 1361 611 1404">Member, Mentor:</td> <td data-bbox="611 1361 1465 1404"></td> </tr> </table>	President:		Member:		Member, Mentor:	
President:							
Member:							
Member, Mentor:							

Образац Q4.09.13 - Издање 1

Doktorska disertacija pod nazivom “Primena globalnih modela u analizi fizičkih i hemijskih procesa u niskotemperaturnim plazmama na atmosferskom pritisku” urađena je pod rukovodstvom dr Saše Gocića, vanrednog profesora na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta Univerziteta u Nišu.

Ovom prilikom bih se najpre zahvalio svom mentoru dr Saši Gociću na velikoj pomoći u razvoju globalnog modela, pisanju radova, konstantnom praćenju napretka, konstruktivnim savetima i ogromnoj podršci u finalizaciji disertacije.

Rad na disertaciji započet je u okviru doktorskih studija na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu pod mentorstvom akademika Zorana Lj. Petrovića sa Instituta za fiziku. Zahvalio bih se profesoru Petroviću na višegodišnjem strateškom rukovodstvu, koji je svojim iskustvom, savetima u pisanju radova i načinu prezentovanja rezultata, dao veliki doprinos mom sazrevanju u naučnom smislu.

Takođe bih se zahvalio članovima Laboratorije za gasnu elektroniku na Institutu za fiziku, dr Dragani Marić na pomoći i korisnim savetima u pisanju radova, kao i dr Neveni Puač i dr Nenadu Selakoviću na formiranju eksperimentalne postavke i obezbeđivanju eksperimentalnih rezultatata za verifikaciju modela. Ova doktorska disertacija je delom urađena i finansirana od strane projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije ON171037 i III41011.

Na kraju bih se zahvalio mojoj majci Mirjani na razumevanju, požrtvovanju i naporima koje je uložila u moje školovanje.

SADRŽAJ

1. NISKOTEMPERATURNNA PLAZMA	1
1.1 Osnovne karakteristike.....	1
1.2 Odstupanje od lokalne termodinamičke ravnoteže i funkcija raspodele elektrona po energiji	4
1.3 Formiranje niskotemperaturnih plazmi u laboratoriji	7
1.3.1 Proboj na visokom (atmosferskom) pritisku	9
1.4 Niskotemperaturna plazma na atmosferskom pritisku.....	11
2. PRIMENE NISKOTEMPERATURNIH PLAZMI	17
2.1 Primena niskotemperaturnih plazmi na niskom pritisku	17
2.2 Primena niskotemperaturnih plazmi na atmosferskom pritisku.....	18
3. PRORAČUN FUNKCIJE RASPODELE ELEKTRONA PO ENERGIJI I KOEFICIJENATA BRZINE ELEKTRONSKIH SUDARNIH PROCESA	22
3.1 Funkcija raspodele čestica po položajima i brzinama; Transportni koeficijenti....	22
3.2 Sudarni procesi; Totalni i diferencijalni presek za rasejanje	24
3.3 Bolcmanova kinetička jednačina za elektrone u slabojonizovanoj niskotemperaturnoj plazmi; Model roja elektrona	27
3.4 Aproksimacija dva člana za proračun funkcije raspodele elektrona po brzini	29
3.5 Bolcmanov kolizioni član u aproksimaciji dva člana i veza sa presekom za prenos impulsa.....	31
3.6 Kolizioni članovi za neelastične procese	32
3.7 Bolcmanova jednačina za elektrone u aproksimaciji dva člana.....	33
3.8 Proračun funkcije raspodele elektrona po energiji pomoću programa BOLSIG+.....	34
3.9 Proračun transportnih koeficijenata i koeficijenata brzine elektronskih sudarnih procesa pomoću programa BOLSIG+	37
4. MODELI PLAZME	39
4.1 Čestični modeli	40
4.2 Fluidni i hibridni modeli	40
4.2.1 Fluidne jednačine kao momenti Bolcmanove kinetičke jednačine uz uključivanje nekonzervativnih sudarnih procesa	41
4.3 Globalni modeli	46

4.3.1	Balansne jednačine globalnog modela	47
4.3.2	Potrebe za globalnim modelima u modelovanju niskotemperaturne plazme..	50
5.	UTICAJ BAZE PRESEKA NA EEDF I KOEFICIJENTE BRZINE	52
5.1	Primer za He	53
5.2	Primer za H ₂ O	56
6.	GLOBALNI MODEL ZA SLUČAJ He/O₂ RADIOFREKVENTNE PLAZME U KONTAKTU SA VLAŽNIM VAZDUHOM	61
6.1	Model sa zadatom temperaturom i koncentracijom elektrona	61
6.1.1	Uticaj EEDF na sastav plazme	65
6.1.2	Uticaj EEDF na glavne fizičke i hemijske procese	68
6.2	Uticaj koncentracije elektrona na EEDF i hemijski sastav plazme	72
7.	GLOBALNI MODEL SA PRORAČUNOM TEMPERATURE ELEKTRONA	81
7.1	Proračun temperature za slučaj zadate koncentracije elektrona	81
7.2	Uticaj temperature elektrona na hemijski sastav plazme	86
8.	POREĐENJE REZULTATA GLOBALNOG MODELA SA REZULTATIMA FLUIDNOG MODELA ZA IMPULSNI DC PLAZMA MLAZ	92
8.1	Globalni model i procena ulaznih parametara iz fluidnog modela	93
8.2	Uticaj udela vazduha, koncentracije i temperature elektrona na koncentraciju OH radikala.....	96
8.3	Uticaj vodene pare i EEDF na koncentraciju OH radikala	97
8.4	Uticaj temperature elektrona na procese proizvodnje i potrošnje OH radikala	99
8.5	Uticaj vodene pare na hemijski sastav plazme i glavni kanali za RONS	102
9.	GLOBALNI MODEL SA PRORAČUNOM TEMPERATURE I KONCENTRACIJE ELEKTRONA UZ UKLJUČENJE ZAPREMINSKOG PROTOKA GASA	107
9.1	Postavka modela - balansne jednačine i hemijski sastav	107
9.2	Set preseka za elektronske sudarne procese.....	110
9.3	Određivanje početnih uslova za proračun i poređenje sa eksperimentom	116
9.3.1	Formiranje plazma mlaza i eksperimentalna dijagnostika metodom masene spektrometrije.....	116
9.3.2	Proračun protoka gasa	120

9.3.3 Procena gustine apsorbovane snage	121
9.3.4 Procena za udeo azduha i vodene pare; Uticaj vazduha i vodene pare na EEDF	122
9.4 Uticaj protoka na kinetiku osnovnih sastojaka smeše.....	125
9.5 Modelovanje masenog spektra pozitivnih jona.....	126
9.6 Proračun koncentracije i temperature elektrona za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare.....	129
9.7 Glavni kanali proizvodnje i gašenja pozitivnih jona za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare	130
9.8 Uticaj vodene pare na koncentraciju i temperaturu elektrona.....	139
9.9 Uticaj vodene pare na hemijski sastav plazme	148
9.10 Proizvodnja i gašenje negativnih jona	152
9.11 Proizvodnja i gašenje reaktivnih kiseoničnih i azotnih jedinjenja.....	159
10. ZAKLJUČAK	172
PRILOG 1	177
LITERATURA	222
BIOGRAFIJA AUTORA.....	241
BIBLIOGRAFIJA AUTORA.....	243
IZJAVE AUTORA	

1. NISKOTEMPERATURNA PLAZMA

1.1 Osnovne karakteristike

Niskotemperaturna plazma (engl. low temperature plasma, LTP) predstavlja gasoviti sistem koji pored neutralnih čestica sadrži veći ili manji deo jonizovanih atoma/molekula i elektrona, pri čemu je srednja energija elektrona (nekoliko eV) mnogo veća od srednje energije teških čestica (Lieberman, Lichtenberg, 2005; Makabe, Petrović, 2015). Plazma se u prvom redu karakteriše koncentracijama i temperaturama (srednjim energijama) njenih komponenata, odnosno vrsta čestica koje ulaze u sastav. Osnovne parametre plazme predstavljaju koncentracija $n_e[\text{cm}^{-3}]$ i temperatura elektrona $T_e[\text{eV}]$, definisana kao ekvivalent srednje energije na osnovu relacije $T_e[\text{eV}] \cong (k_B T_e[\text{K}])/e$ ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}$, $1\text{eV} \sim 11600\text{K}$).

Prema vrednosti elektronske temperature u literaturi se može naći karakterizacija LTP uslovom $T_e < 10\text{eV}$ (Taccogna, Dilecce, 2016), dok se na osnovu stepena jonizacije:

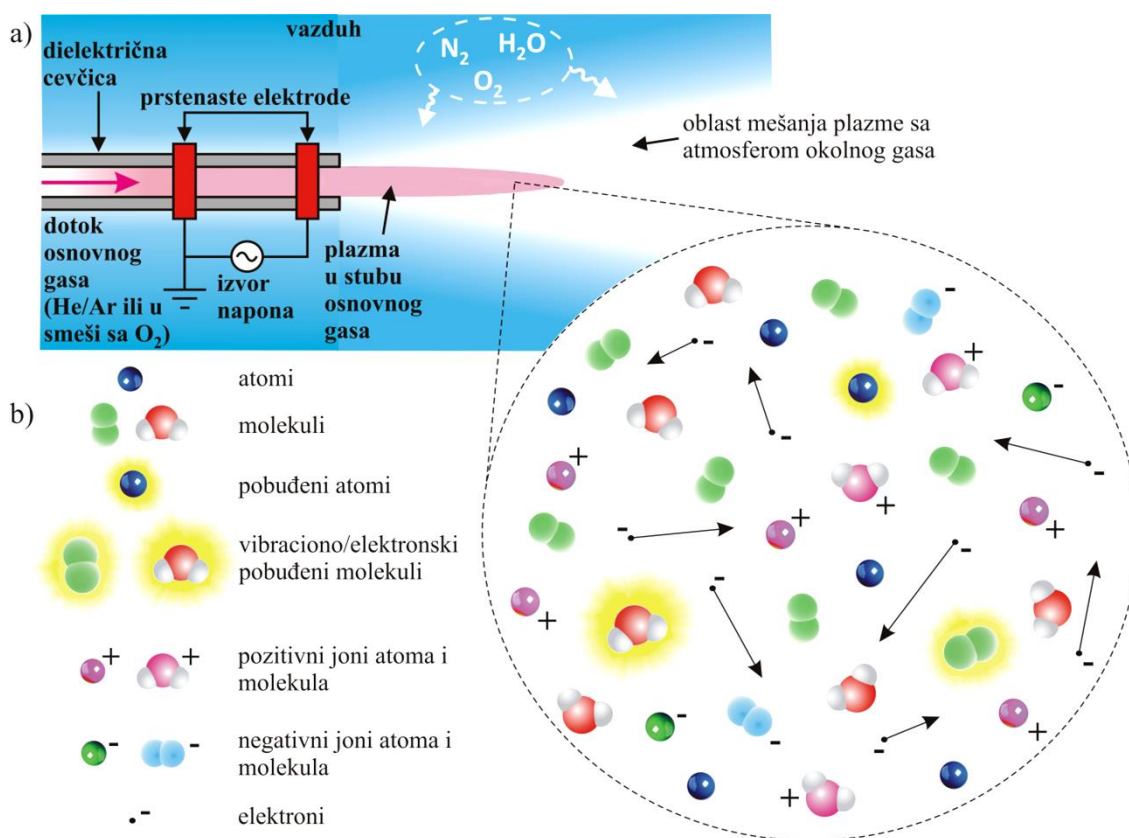
$$\chi = \frac{n_p}{n_p + n_g}, \quad (1)$$

definiše se podela na slabo ($\chi < 10^{-3}$) i jako jonizovane plazme ($\chi \geq 10^{-3}$) (Makabe, Petrović, 2015). U relaciji (1) n_p i n_g predstavljaju koncentracije pozitivnih jona i neutralnih čestica gasa. Jedno od osnovnih svojstava plazmenog stanja materije (Chen, 1984) jeste makroskopska kvazineutralnost kada važi $n_p = n_e$, odnosno u slučaju plazmi složenijeg hemijskog sastava $\sum_i n_i e_i = 0$ gde su n_i koncentracija i e_i naelektrisanje čestica i -te komponente plazme (Milić, 1970). Jako jonizovane plazme se nazivaju i bezkolizionim obzirom da među naelektrisanim česticama dominira kulonovska interakcija određena silama dugog dometa, dok su kod slabojonizovanih plazmi važni neelastični sudari naelektrisanih čestica sa neutralima, određeni interakcijama kratkog dometa.

U prisustvu elektronegativnih gasova zahvatom elektrona u plazmi nastaju i negativni joni. Ukoliko je njihova koncentracija n_n , definiše se stepen elektronegativnosti $\alpha = n_n/n_e$, koji može imati visoku vrednost posebno tokom

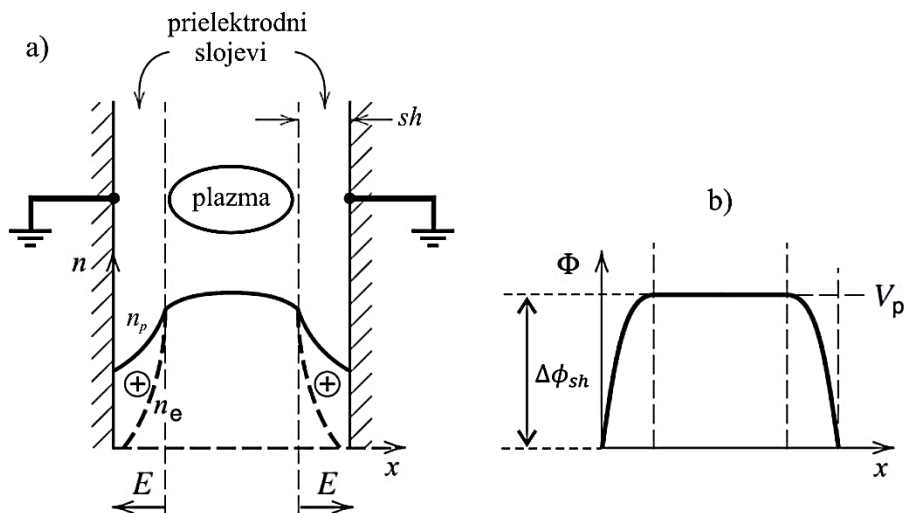
relaksacije usled gubitaka elektrona u procesima zahvata, rekombinacije i gubitaka na zidu (von Keudell, der Gathen, 2017). U slučaju slabojonizovane LTP glavni mehanizam jonizacije jeste jonizacija atoma/molekula gasa udarom elektrona koji su ubrzani primenjenim električnim poljem. Iako je prosečna energija po elektronu nekoliko eV, elektroni iz repa funkcije raspodele imaju dovoljno energije za jonizaciju čestica gasa. Jonizacija elektronskim udarom takođe predstavlja jednu od osnovnih karakteristika LTP, za razliku od visokotemperaturne (termalne) plazme gde je značajan mehanizam termalne jonizacije određen neelastičnim sudarima između teških čestica.

Pored elektrona, metastabili predstavljaju komponentu plazme koja može igrati važnu ulogu u jonizaciji kroz jonizaciju iz pobuđenog stanja (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018), Peningovu jonizaciju i procese na površini. Na atmosferskom pritisku, prilikom kontakta plazme sa vlažnim vazduhom, formiraju se hemijski reaktivna jedinjenja kiseonika i azota, kao i klasteri jona sa molekulima H_2O . Na Slici 1a) šematski je prikazan plazma mlaz kao jedan od najvažnijih tipova LTP na atmosferskom pritisku, dok Slika 1b) ilustruje kompleksni sastav formirane plazme.



Slika 1. Šematski prikaz plazma mlaza a) i ilustracija sastava formirane plazme b).

Još jedan važan segment u opisu LTP je svakako uticaj površine elektroda ili zidova komore za pražnjenje. Interakcija plazme sa zidovima ima za posledicu formiranje prelaznih slojeva sa neuniformnom raspodelom koncentracije elektrona, jona i plazmenog potencijala (Slika 2a,b). U prelaznom sloju je narušena kvazineutralnost zbog različitih pokretljivosti elektrona i jona, a gradijent prostornog naelektrisanja dovodi do indukovanja jakog električnog polja usled pada potencijala $\Delta\phi_{sh}$. Električno polje prelaznog sloja može znatno modifikovati funkciju raspodele elektrona po energiji (Taccogna, Dilecce, 2016) usled stohastičnog grejanja ili gubitaka elektrona na zidu (Hobbs, Wesson, 1967; Godyak, Piejak, 1990; Vahedi et al., 1993; Sydorenko, Smolyakov, Kaganovich, Raitses, 2006; Taccogna, Longo, Capitelli, Schneider, 2008). Uticaj zidova ogleda se i kroz različite procese na površini, kao i kroz flukse elektrona, jona i reaktivnih neutrala ka zidu.



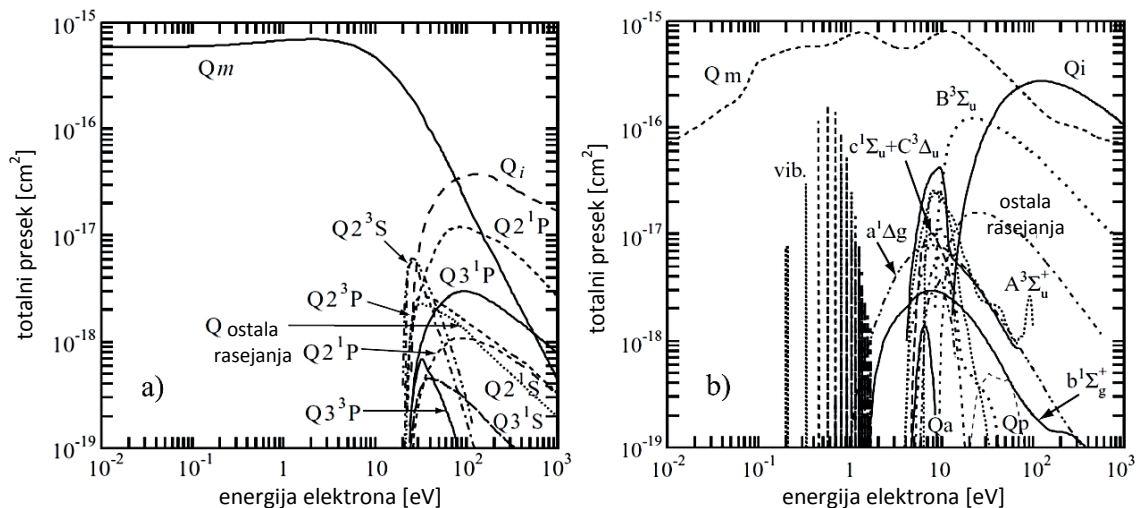
Slika 2. Prelazni slojevi u kontaktu plazme sa metalnim zidom a) i raspodela plazmenog potencijala b) (preuzeto iz: Lieberman, Lichtenberg, 2005, prevedeno na srpski).

1.2 Odstupanje od lokalne termodinamičke ravnoteže i funkcija raspodele elektrona po energiji

Niskotemperaturna plazma u velikom broju slučajeva izrazito odstupa od stanja termodinamičke ravnoteže (engl. thermodynamical equilibrium, TE) ili lokalne termodinamičke ravnoteže (LTE). U stanju TE/LTE, u kojem su temperature svih komponenta plazme jednake uz odsustvo prostornih gradijenata ili lokalno, može se definisati termodinamička temperatura sistema $T_e = T_i = T_g = T[\text{K}]$ kao parametar Maksvel-Bolcmanove raspodele po energiji ε (engl. Maxwell-Boltzmann, MB) koja opisuje svaku od komponenta plazme (von Keudell, der Gathen, 2017; Taccogna, Dilecce, 2016):

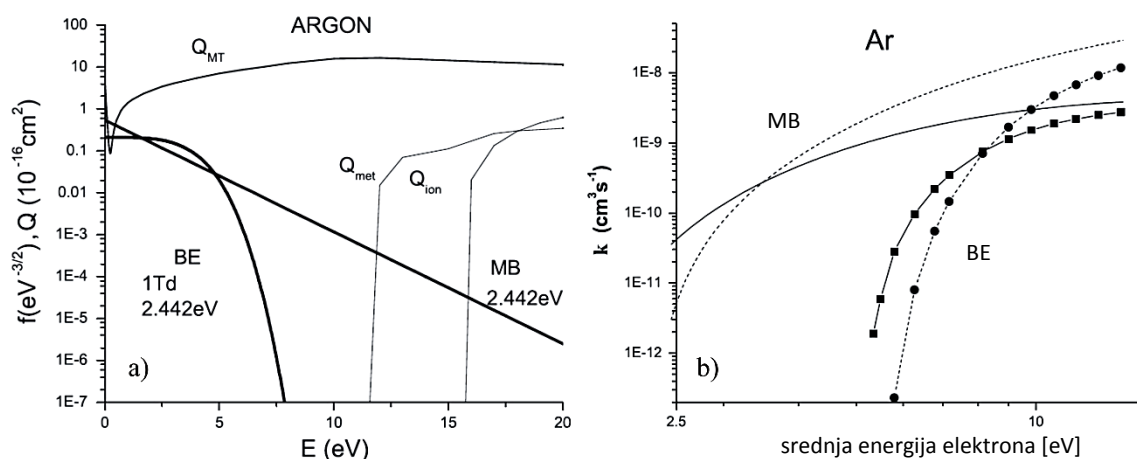
$$f_{MB}(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(k_B T)^{3/2}} \sqrt{\varepsilon} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right). \quad (2)$$

Koncept termodinamičke ravnoteže zahteva posebne uslove pri kojima je izjednačavanje temperatura svih komponenta omogućeno visokim kolizionim frekvencijama i nema interakcije plazme sa zidovima reaktora. Smatra se da TE/LTE postaje samo pogodna aproksimacija, približno validna jedino ukoliko je brzina prenosa energije od električnog izvora na elektrone daleko manja od brzine prenosa energije između čestica u procesima sudara. Snaga električnog izvora prevashodno se troši na ubrzavanje elektrona, dok je transfer energije sa elektrona na atome i molekule određen zavisnošću veličine preseka za odgovarajući akt rasejanja od energije elektrona, kao i tipom sudara. Na primer, na Slici 3a,b) prikazani su setovi preseka za rasejanje elektrona na atomu He i molekulu O₂ u osnovnom stanju (Makabe, Petrović, 2015). Elastično rasejanje je najučestalije na srednjim energijama elektrona karakterističnim za LTP ($\leq 10\text{eV}$), međutim ono predstavlja jako neefikasan akt transfera kinetičke energije na teške čestice usled malog odnosa masa ($2m_e/M \sim 10^{-5} - 10^{-4}$). Neelastična rasejanja (ekscitacije i jonizacije) imaju niže kolizione frekvencije i javljaju se iznad odgovarajućih energijskih pragova, ali su efikasnija za prenos energije pri čemu se energija elektrona troši na pobuđivanje i jonizaciju atoma i molekula. Joni efikasnije razmenjuju impuls i kinetičku energiju sa atomima i molekulima gasa zbog približnih masa. Dakle, elektroni nisu u termalnoj ravnoteži sa jonima i neutralima, odnosno važi uslov $T_e \gg T_i \cong T_g$.



Slika 3. Set preseka (Q) za rasejanje elektrona na atomu He a) i molekulu O₂ b).
(preuzeto iz: Makabe, Petrović, 2015, prevedeno na srpski)

Pored odstupanja plazme kao celine od LTE stanja, elektronski sudarni procesi izazivaju i značajno odstupanje funkcije raspodele elektrona po energiji (engl. electron energy distribution function, EEDF) od MB (Petrović, Raspopović, Dujko, Makabe, 2002; Petrović et al., 2007; Petrović et al., 2009). Karakterističan primer sa izraženim gubicima energije elektrona u neelastičnim procesima u slučaju argona prikazan je na Slici 4a,b). Razlika između repa neravnotežne (engl. Boltzmann equation, BE) i MB EEDF za istu srednju energiju predstavlja važan efekat neravnoteže jer taj deo EEDF određuje brzine procesa sa visokim pragom, značajne za jonizaciju.



Slika 4. Preseci za rasejanje elektrona na atomu Ar, BE i MB EEDF za istu srednju energiju a), koeficijenti brzine za jonizaciju (puna linija) i ekscitaciju (tačkasta linija) atoma argona b) (preuzeto iz: Petrović et al., 2007, prevedeno na srpski).

Efekat koji se ogleda u formiranju karakterističnih struktura u formi platoa u EEDF mogu izazvati superelastični sudari $M^* + e(\varepsilon) \rightarrow M + e(\varepsilon + \Delta\varepsilon)$ pri uslovima visoke naseljenosti pobuđenih stanja i niske srednje energije elektrona, (M^* predstavlja elektronsko pobuđeno stanje atoma ili rotaciono/vibraciono pobuđeno stanje molekula, kojem odgovara energija $\Delta\varepsilon$) (Capitelli et al., 2016; Capitelli, Ferreira, Gordiets, Osipov, 2000; Colonna, Capitelli, 2001; Guerra, Sa, Loureiro, 2004). Ovakvi uslovi su tipični za plazmu u stanju relaksacije.

Pored navedenih efekata do kojih dovode sudari elektrona sa neutralima ($e - n$) u plazmi, uticaj na EEDF mogu imati procesi koji se odigravaju u prelaznim slojevima između plazme i metalnog zida gde postoji jako električno polje (Slika 2) usled pada potencijala $\Delta\phi_{sh}$ (Hobbs, Wesson, 1967; Taccogna, Dilecce, 2016). Na primer, za radiofrekventno (RF) kapacitivno spregnuto pražnjenje u argonu na 13,56MHz i nižim pritiscima ($p < 100\text{mTorr}$), EEDF ima oblik dvotemperaturne MB raspodele usled stohastičnog grejanja elektrona koji se reflektuju od potencijalne barijere prelaznog sloja (Godyak, Piejak, 1990; Vahedi et al., 1993). Visokoenergijski rep održava jonizaciju elektronskim udarom iako je srednja energija elektrona u plazmi pri oscilovanju tipično $T_e < 1\text{eV}$. Na višim pritiscima ($p \geq 0,5\text{Torr}$) efekti stohastičnog grejanja su znatno manji, kao i difuzioni gubici, jonizaciju održavaju sekundarni elektroni koji se ubrzavaju potencijalom prielektrodnog sloja (Lieberman, Lichtenberg, 2005). Zbog efekata Ramzauerovog minimuma EEDF dobija konveksni oblik uz znatno sporije opadanje na energijama $T_e > 1\text{eV}$ (Godyak, Piejak, 1990).

Ukoliko su u plazmi izraženi gubici elektrona na zidovima, npr. pri uslovima kada je karakteristična dimenzija reaktora manja od srednjeg slobodnog puta elektrona između elastičnih $e - n$ sudara, elektroni mogu biti rasejani ka zidu i EEDF pokazuje brzo opadanje u odnosu na MB iznad energije $w_x \geq e\Delta\phi_{sh}$. Na primer, za slučaj plazma ubrzavača (potisnik) u radu (Sydorenko, Smolyakov, Kaganovich, Raitses, 2006) prikazano je poređenje raspodele elektrona po brzinama sa MB raspodelom za komponente brzine normalne i tangencijalne u odnosu na zid. Sa druge strane, ukoliko je proces sekundarne emisije značajno izražen, sekundarni elektroni ubrzani potencijalom $\Delta\phi_{sh}$ ulaze u plazmu sa visokom energijom što izaziva tipičan skok u repu EEDF (Taccogna, Longo, Capitelli, Schneider, 2008).

1.3 Formiranje niskotemperaturnih plazmi u laboratoriji

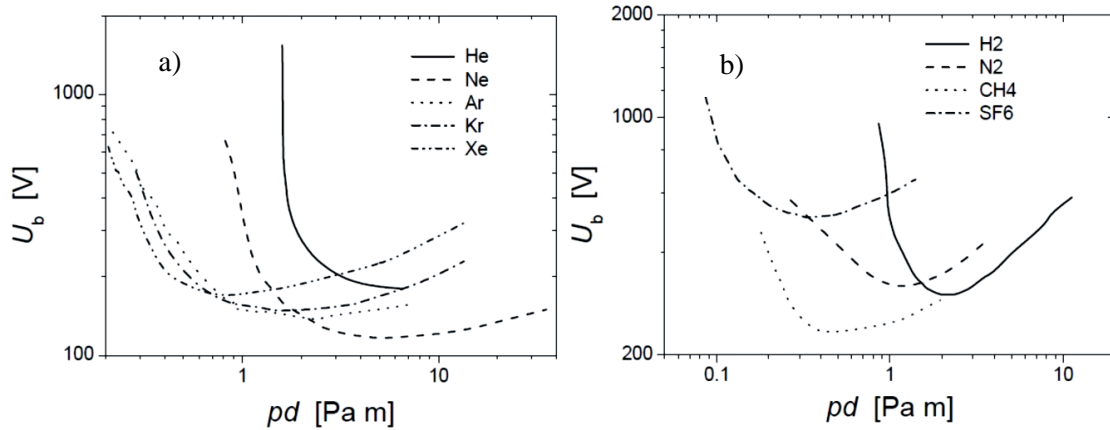
Niskotemperaturne plazme se formiraju električnim probojem u gasu pod uticajem spoljašnjeg električnog polja. Električno pražnjenje se javlja kada je proizvodnja naelektrisanih čestica dovoljna da nadoknadi njihove gubitke usled rekombinacije i flukseva ka zidu, što se dešava pri naponima većim ili jednakim od tzv. probojnog napona U_b (Meek, Craggs, 1953; von Keudell, der Gathen, 2017). Probojni napon zavisi od pritiska gasa, hemijskog sastava gasa, materijala i konfiguracije elektrodnog sistema kao i frekvencije primenjenog napona. Od pritiska gasa takođe zavisi mehanizam proboja (von Keudell, der Gathen, 2017; Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017; Mesyats et al., 2006; Raizer, 1991; Meek, Craggs, 1953).

Na niskom pritisku ($p \sim 10\text{mTorr} - 10\text{Torr}$) LTP se formiraju relativno lako u uslovima koji odgovaraju minimumu Pašenove krive (Slika 5a,b), pri čemu je prenos energije čestica u sudarima spor usled visokog odnosa masa neutrala i elektrona i niskih kolizionih frekvencija. U slučaju jednosmernog (engl. direct current, DC) napona mehanizam proboja zasniva se na razvoju prostornog naelektrisanja kroz formiranje višestrukih lavina (Phelps, Petrović, 1999). Proboj nastaje kada svaki pozitivni jon, nastao u jonizaciji elektronskim udarom, na katodi proizvede bar jedan sekundarni elektron. Za jonizaciju elektronskim udarom definiše se prvi Taunzendov koeficijent koji predstavlja broj aktova jonizacije na jedinici dužine puta $\alpha = A p \exp(-Bp/E)$, gde je p pritisak gasa a E jačina električnog polja. Konstante A i B se određuju empirijski za svaki gas. Za emisiju sekundarnih elektrona na katodi izazvanu pozitivnim jonima definiše se treći Taunzendov koeficijent γ_i , kao i γ_{ph} , γ_m za emisiju izazvanu fotonima i metastabilima. Zavisnost probojnog napona od proizvoda pritiska gasa i međuelektrodno rastojanja d data je Pašenovim zakonom:

$$U_b = \frac{B(pd)}{\ln \frac{A(pd)}{\ln(1 + 1/\gamma_i)}} . \quad (3)$$

Uslovima koji odgovaraju levoj strani Pašenove krive $pd < (pd)_{min}$ odgovara mali pritisak gasa ili malo međuelektrodno rastojanje (kratak put lavine). U oba slučaja elektroni iz lavine dostižu anodu pre formiranja dovoljnog broja pozitivnih jona i za proboj je potreban veći napon. Desnoj strani Pašenove krive $pd > (pd)_{min}$ odgovara

veći pritisak ili veće međuelektrodno rastojanje. Pri većem pritisku elektroni između sudara ne dobijaju dovoljno energije za jonizaciju. Pri većem međuelektrodnom rastojanju manja je jačina polja koje ubrzava elektrone, usled čega je neophodan veći napon za nastanak proboja.



Slika 5. Pašenove krive za neke atomske a) i molekulske gasove b) (preuzeto iz: Marić et al., 2006).

U slučaju naizmennog (engl. alternating current, AC) napona sa niskom frekvencijom (kHz) mehanizam proboja je “kvazi-DC“, obzirom da EEDF postiže relaksaciju na oblik u DC polju kroz $e - n$ sudare (Makabe, Petrović, 2015). Na visokim frekvencijama (MHz, GHz) $e - n$ sudari dovode do faznog pomaka između oscilovanja elektrona i periodičnih promena električnog polja $E_0 e^{i\omega t}$, a energija koju elektroni dobijaju za jonizaciju nakon više oscilacija određena je odnosom frekvencije polja ω i kolizijske frekvencije ν_m (von Keudell, der Gathen, 2017). U opisu transporta elektrona pod delovanjem AC polja po analogiji sa transportom u DC polju često se koristi teorema “efektivnog” polja:

$$E_{eff}^{DC} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \frac{\nu_m}{\sqrt{\nu_m^2 + \omega^2}}. \quad (4)$$

1.3.1 Proboj na visokom (atmosferskom) pritisku

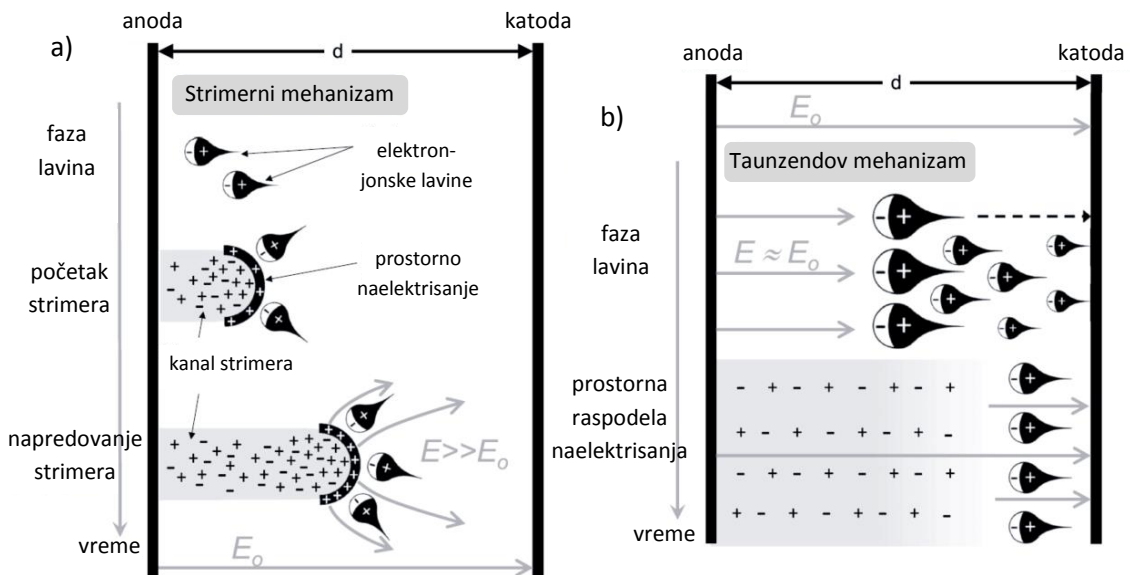
Na visokom, odnosno atmosferskom pritisku mehanizam proboja se bitno razlikuje usled visoke koncentracije gasa ($\sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$) koja dovodi do prekomerne jonizacije i formiranja tzv. strimera (von Keudell, der Gathen, 2017; Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017; Mesyats et al., 2006; Raizer, 1991; Meek, Craggs, 1953). U slučaju proboja u vazduhu, izraženi su gubici elektrona u procesima zahvata zbog prisustva elektronegativnih gasova (O_2 , H_2O), usled čega je električno polje za formiranje strimera oko 30 kV/cm (Raizer, 1991). Kada proizvodnja elektrona u procesima jonizacije elektronskim udarom postane dovoljna da nadoknadi gubitke u procesima zahvata, dolazi do razvoja primarnih elektron-jonskih lavina. Ove lavine formiraju prostorno naelektrisanje visoke koncentracije, koje dovodi do značajne promene lokalnog električnog polja i razvoja sekundarnih lavina u gasnoj fazi usled fotojonizacije molekula gasa ili odvajanja elektrona od negativnih jona. Jonizacioni region se brzo širi formirajući plazmeni kanal, strimer u vremenskom intervalu reda nanosekundi (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017). U prednjem delu („glava“) strimera ($\sim 100 \mu\text{m}$) lokalno električno polje ima visoku vrednost i dovodi do velike brzine drifta elektrona i samog strimera (10^8 cm/s). Prečnik strimernog kanala odgovara maksimalnoj veličini primarne lavine $1/\alpha$ (gde je α prvi Taunzendov koeficijent), dok je koncentracija elektrona $10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (Raizer, 1991). Na slici 6a) prikazan je slučaj pozitivnog (katodno usmerenog) strimera, gde elektroni driftuju ka anodi dok spori jona zaostaju u prednjem delu kanala. Novi elektroni, nastali fotojonizacijom gasa ispred glave strimera, driftuju ka anodi neutralizujući jone u kanalu i ostavljajući za sobom nove pozitivne jone što rezultuje napredovanjem strimera ka katodi. U slučaju negativnog strimera, u čelu dominiraju elektroni koji driftuju ka anodi dok joni preostaju u kanalu koji se neutralizuje difuzijom elektrona iz okolnog gasa (von Keudell, der Gathen, 2017).

Strimer nastaje kada je električno polje prostornog naelektrisanja u lavini približno jednako spoljašnjem polju E_0 (Meek-ov kriterijum) (Meek, Craggs, 1953):

$$\frac{e}{4\pi\epsilon_0 R} e^{\alpha_{\text{eff}}(E_0)d} \cong E_0. \quad (5)$$

Koeficijent $\alpha_{\text{eff}} = \alpha - a$ predstavlja “efektivni” prvi Taunzendorv koeficijent gde je a koeficijent zahvata elektrona, a $R \sim 100\mu\text{m}$ radijus glave strimera. Za primarnu multiplikaciju elektron-jonskih parova važi $\exp[\alpha_{\text{eff}}(E_0)d] \cong 10^8$ (u vazduhu tipično za $pd > 1000\text{Torr}\cdot\text{cm}$) i kriterijum (5) je zadovoljen za $\alpha_{\text{eff}}(E_0)d \cong 18 - 20$.

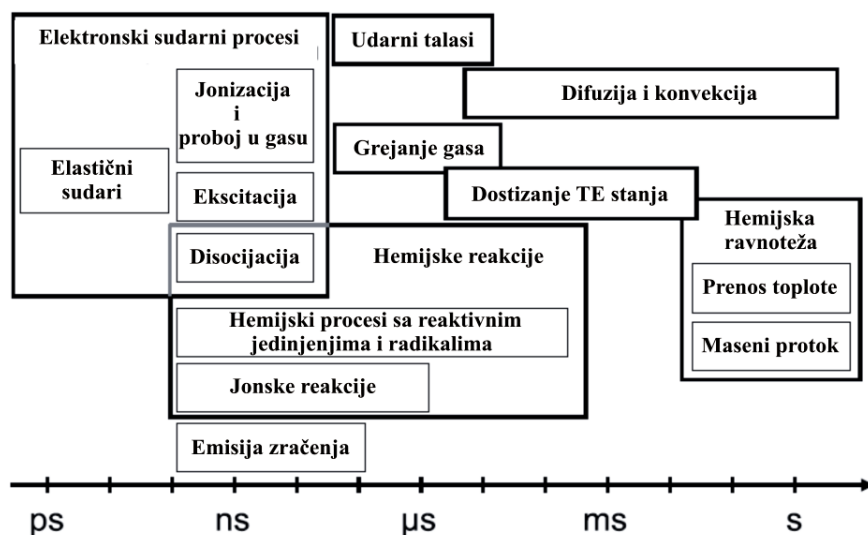
Na slici 6b) ilustrovan je, poredjenja radi, Taunzendorv mehanizam višestrukih lavina. Emisija sekundarnih elektrona na katodi, karakteristična za taj slučaj, igra značajnu ulogu do $pd \leq 200\text{Torr}\cdot\text{cm}$ (Raizer, 1991). Na visokom pritisku proboj se odigrava daleko brže kroz napredovanje strimera u vremenskom intervalu karakterističnom za drift elektrona od jedne do druge elektrode i sekundarna emisija na katodi se može zanemariti obzirom da joni ne stižu do elektrode već se neutralizuju u kanalu strimera.



Slika 6. Šematski prikaz razvoja pozitivnog strimera na visokom pritisku a) i Taunzendorvog mehanizma proboja na niskom pritisku b) (preuzeto iz: Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017, prevedeno na srpski).

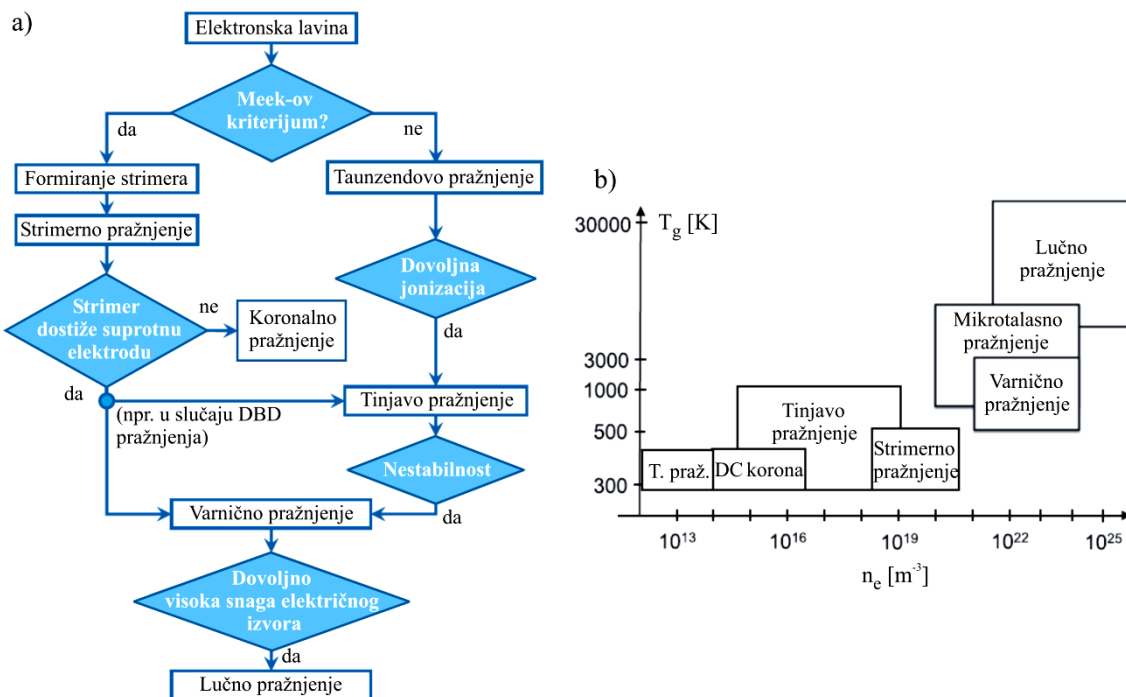
1.4 Niskotemperaturna plazma na atmosferskom pritisku

Kada strimer pređe međuelektrodno rastojanje formira se kanal kvazineutralne plazme visoke provodnosti i nastaje varnično pražnjenje. Međutim, prekomerna jonizacija spreže kinetiku elektrona i jona pa se samim tim vrši veliki prenos energije na neutrane, odnosno veliki deo energije električnog izvora se troši na grejanje gasa. Pri dovoljno visokoj snazi električnog izvora, varnično pražnjenje prelazi u lučno, temperatura gasa može dostići red veličine 10^4K (plazma u stanju LTE) i koncentracija elektrona $n_e \sim 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ($\chi < 10^{-2}$). Provodnost plazme i jačina struje su reda $\sigma \sim 100\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ i $i \sim 10^4\text{A}$ (Raizer, 1991). Na Slici 7. prikazana je šema sa karakterističnim vremenima sudarnih, transportnih procesa i hemijskih reakcija u niskotemperaturnim plazmama na atmosferskom pritisku (engl. atmospheric pressure low temperature plasma, AP LTP). Na Slici 8a) šematski su prikazani tipovi plazmi na atmosferskom pritisku a na Slici 8b) karakteristične vrednosti koncentracije elektrona i temperature gasa (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017).



Slika 7. Karakteristična vremena sudarnih i transportnih procesa u AP LTP (preuzeto iz:

Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017, prevedeno na srpski).



Slika 8. Tipovi AP plazmi a) i karakteristične koncentracije elektrona i temperature gasa (T. se odnosi na tamno Taunzendovo pražnjenje) b) (preuzeto iz: Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017, prevedeno na srpski).

U cilju formiranja AP LTP mora se obezbediti neka tehnika kontrole (ograničenja) stepena jonizacije (Becker, Kogelschatz, Schoenbach, Barker, 2005). Odstupanje od termodinamičke ravnoteže takođe može biti postignuto brzim promenama električnog polja, gde se najčešće koristi RF ili impulsni (~ 10 ns) napon (Taccogna, Dilecce, 2016; Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017).

Ukoliko Meek-ov kriterijum (5) nije zadovoljen razvija se difuziono pražnjenje, međutim pojava nestabilnosti i prekomerne jonizacije zavisi od toga da li postoji neravnoteža između procesa proizvodnje i gubitaka elektrona (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017). Tu treba imati u vidu izrazito nelinearnu zavisnost koeficijenta brzine za jonizaciju elektronskim udarom iz osnovnog stanja od srednje energije elektrona (npr. Slika 4b), visoku koncentraciju gasa na 1atm ($n_g \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$), kao i činjenicu da rekombinacija predstavlja nelinearan proces u funkciji koncentracije elektrona ($n_e \approx n_p$):

$$\frac{dn_e}{dt} \cong k_{ion}(T_e)n_en_g - k_r n_e^2 - \frac{D_a}{\Lambda^2} n_e \gg 0? \quad (6)$$

Pored navedenih procesa, Peningova jonizacija, zahvati, odvajanje elektrona, tročestični zahvati i neutralizacije mogu uticati na neravnotežu (6), kao i jonizacije iz metastabilnog stanja čiji je koeficijent brzine tipično nekoliko redova veličine veći od koeficijenta za jonizaciju iz osnovnog stanja u intervalu $T_e = 1 - 10\text{eV}$. Karakteristični slučajevi kod kojih je neravnoteža (6) izazvana mogu se naći u literaturi (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017).

Najjednostavniji način za ograničenje jačine struje i stepena jonizacije u kanalu plazme zasniva se na rednom vezivanju parazitne otpornosti R sa plazmenom komorom, zato što porast u provodnosti plazme izaziva smanjenje napona na elektrodnom sistemu, $u_{pl}(t) = u_{uk}(t) - i(t)R$. Ovaj metod se najčešće koristi u stabilizaciji DC plazmi. U slučaju brzo promenljivih struja smanjenje napona na elektrodnom sistemu se efikasnije postiže upotrebom induktivnosti:

$$u_{pl}(t) = u_{uk}(t) - L \frac{di}{dt}, \quad (7)$$

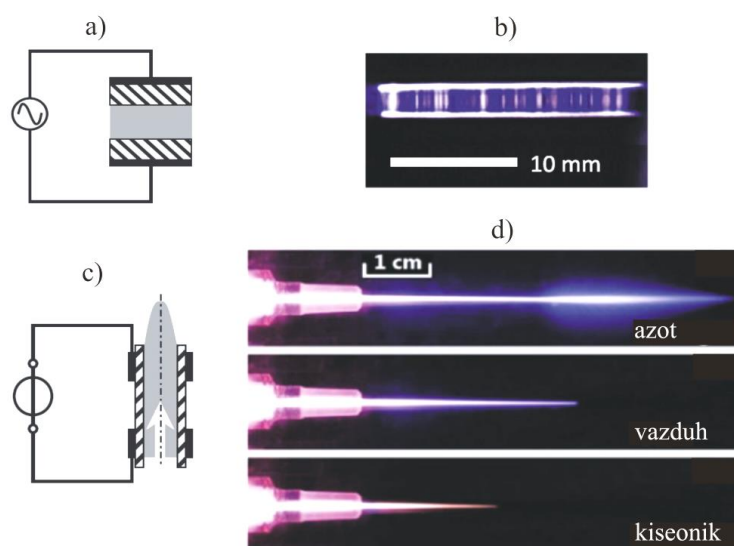
dok upotreba kondenzatora u stabilizaciji napona poseduje tzv. “memorijski“ efekat:

$$u_{pl}(t) = u_{uk}(t) - \frac{1}{C} \int_0^t i(t') dt', \quad (8)$$

i takođe blokira pojavu DC struja zbog čega se često koristi u stabilizaciji AC plazmi.

Jedan od najefikasnijih načina kontrole stepena jonizacije u AP LTP jeste upotreba dielektrične barijere (engl. dielectric barrier discharge, DBD) koja se nanosi na jednu od elektroda ili obe (Slika 9a). Depozicija naelektrisanih čestica na površini dielektrika predstavlja ekranirajući efekat koji umanjuje jačinu električnog polja u međuelektrodnom prostoru i time smanjuje prekomernu jonizaciju (Becker, Kogelschatz, Schoenbach, Barker, 2005). U ovom tipu pražnjenja strimerni mehanizam može dovesti do tzv. “mikropražnjenja“ u formi filamenata (Slika 9b). Razvoj filamenata započinje Taunzendovim mehanizmom ($\sim 100\text{ns}$) nakon čega se javlja pozitivni strimer usled nagomilavanja naelektrisanja uz anodu i značajnije perturbacije električnog polja. Iza svakog strimera se razvija prelazno tinjavo pražnjenje u formi kanala. Filamenti se šire na površini dielektrične barijere i plazma prekriva veću površinu u odnosu na presek pojedinačnih filamenata. DBD pražnjenje se može formirati jedino u slučaju AC (RF) ili pulsnog polja, gde struja pomeranja omogućava

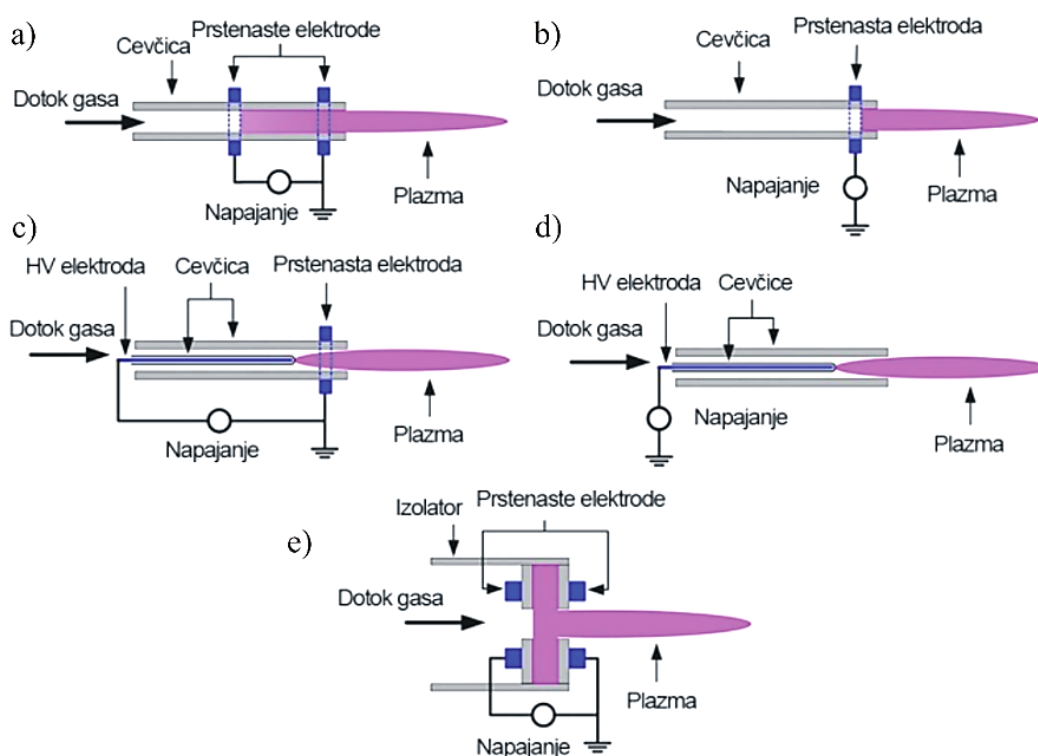
kontinuitet između kondukcijske struje u međuelektrodnom prostoru i elektrodama. Dodatna stabilizacija DBD pražnjenja može se postići upotrebom induktivnosti (Aldea, Peeters, De Vries, Van De Sanden, 2005). Kao dielektrični materijal može se koristiti staklo, kvarc, keramika, plastika, silikonska guma ili teflon. Međuelektrodno rastojanje je tipično 0,1 – 10mm i amplituda napona 1 – 100kV. Sličan efekat kontrole stepena jonizacije postiže se u konfiguraciji pražnjenja pri kojoj ulogu druge elektrode igra voda. Električna provodnost vode je daleko manja od provodnosti kanala strimera, što značajno umanjuje kontrakciju plazmenog kanala i protok struje (Bruggeman, Graham, Degroote, Vierendeels, Leys, 2007).



Slika 9. Šema DBD pražnjenja a), plazma mlaza c) i fotografije laboratorijskih uređaja b), d) (preuzeto iz: Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017, prevedeno na srpski).

Jedan od posebno značajnih tipova AP LTP predstavlja plazma mlaz, predstavljen na Slikama 9c-d) i Slikama 10a-e). Prema tipu elektroda plazma mlazevi se mogu podeliti u više potkategorija (Lu, Laroussi, Puech, 2012), dok se kao pobudni napon može koristiti DC (Dudek et al., 2007), AC (Reuter et al., 2012; Kim et al., 2015; Maletić et al., 2015; Guaitella, Sobota, 2015) kao i impulsni (Wu, Xu, Lu, Pan 2012; Karakas, Akman, Laroussi, 2012). Plemeniti gasovi se najčešće koriste kao radni zbog veće toplotne provodnosti i nižeg probojnog napona u odnosu na molekularne gasove (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017) i to helijum (Oh, Gonzalvo, Bradley, 2011) ili argon (Reuter et al., 2012), ali korišćeni su i drugi gasovi kao neon (Robert et

al., 2014) ili kripton (Li et al., 2010). Pored čistih plemenitih gasova mogu se koristiti smeše sa nekim molekularnim gasom (najčešće kiseonik) u malom procentu (0,5-2%) kako bi se povećale koncentracije nekih reaktivnih vrsta od značaja za primenu i dodatno stabilizovalo pražnjenje zbog zahvata elektrona. Plazma mlaz se može smatrati jednom varijantom DBD pražnjenja, obzirom da se najčešća konfiguracija sastoji u prstenastim elektrodama koje obavijaju cev od dielektrika, u kojoj se formira plazma. Međutim, specifičnost plazma mlaza u odnosu na DBD sa ravnim elektrodama čini konstantni protok gasa, koji dodatno stabilizuje pražnjenje kroz dva efekta – kontrolom stepena jonizacije kroz transport naelektrisanih čestica u oblast van elektrodnog prostora i uticaja električnog polja, kao i uklanjanjem viška toplote kroz izbacivanje teških čestica u okolni gas koji se nalazi tipično na sobnoj temperaturi (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017). Time se postiže izrazita termalna neravnoteža između elektrona i jona pri kojoj je srednja energija elektrona tipično par eV dok je temperatura gasa $\leq 40^{\circ}\text{C}$ (Fridman, 2008a). Za uzemljenu granu kola se najčešće vezuje otpornik koji, pored impendanse same plazme, ograničava struju pražnjenja.



Slika 10. Različite konfiguracije plazma mlaza (preuzeto iz: Lu, Laroussi, Puech, 2012, prevedeno na srpski).

U slučaju kada je okolni gas vazduh, konfiniranje plazme u uskom kanalu mlaza predstavlja posledicu izrazitog prostornog gradijenta u efektivnom Taunzendovom koeficijentu za jonizaciju $\alpha_{\text{eff}} = \alpha - a$ zbog prisustva elektronegativnih gasova (Bruggeman, Iza, Brandenburg, 2017). Pored konfiguracije sa dve prstenaste elektrode koje obavijaju dielektričnu cev, plazma mlaz se može formirati sa jednom prstenastom elektrodom, jednom elektrodom u obliku šiljka ili kombinacijom prstenaste elektrode i šiljka, kao što je šematski prikazano na Slici 10 (Lu, Laroussi, Puech, 2012).

Plazma mlaz predstavlja vodeni jonizacioni talas, odnosno sastoji se od niza pulsnih strimera na atmosferskom pritisku (engl. pulsed atmospheric pressure streamer, PAPS) koji se prostiru velikom brzinom (10^5 - 10^9 cm/s) duž puta definisanog stubom radnog gasa u kojem je prostiranje plazme lakše (Robert et al., 2012; Fridman et al., 2013; Gherardi et al., 2015). Za razliku od strimera koji se stohastično prostiru u slobodnom prostoru i često granaju, PAPS ima drugačiju strukturu jer se prostire kroz gas koji je izrazito neuniforman u aksijalnom i radijalnom pravcu zbog mešanja plazme sa okolnim vazduhom.

2. PRIMENE NISKOTEMPERATURNIH PLAZMI

Odstupanje niskotemperaturne plazme od stanja lokalne termodinamičke ravnoteže čini osnovu za veoma široko polje primena (Adamovich et al., 2017), od kojih se mogu izdvojiti obrada materijala u mikroelektronici (Makabe, Petrović, 2015; Lieberman, Lichtenberg, 2005; Reece Roth, 2001), zatim modifikacija površina (Bhoj, Kushner, 2006; Dorai, Kushner, 2003), kao i novija primena u poljoprivredi (Puač et al., 2006), biomedicini (Kong et al., 2009; Fridman et al., 2008b; Fridman, Friedman, Weltmann, Kramer, 2011; vonWoedtke, Metelmann, Weltmann, 2014; Laroussi et al., 2014; Weltmann, von Woedtke, 2017) i tretmanu kancerogenih ćelija (Graves et al., 2012; Metelmann et al., 2015; Laroussi et al., 2014).

2.1 Primena niskotemperaturnih plazmi na niskom pritisku

Intenzivni razvoj tehnologije za obradu materijala, bazirane na primeni kapacitivno spregnute (engl. capacitively coupled plasma, CCP) i induktivno spregnute plazme (engl. inductively coupled plasma, ICP), počinje 80-tih godina 20. veka sa razvojem mikroelektronike. Procesi koji spadaju u plazmenu tehnologiju obrade materijala mogu se podeliti u tri kategorije: plazma nagrivanje, nanošenje tankih slojeva uz raspršivanje i promena karakteristika površine.

Plazma nagrivanje Si i SiO₂ (Manos, Flamm, 1989; Winters, Coburn, 1992; Balooch, Moalem, Wang, Hamza, 1996; Makabe, Petrović, 2002) kao i poluprovodničkih jedinjenja (Donnelly, Flamm, Ibbotson, 1983; Gregus et al., 1993) predstavlja uz fotolitografiju osnovni proces u proizvodnji integralnih kola i još uvek aktuelni predmet istraživanja u cilju daljeg razvoja tehnologije (Makabe, Yagisawa 2011; Makabe, Tatsumi, 2011; Donnelly, Kornblit, 2013). Proizvodnja integralnih kola sa velikim brojem tranzistora (engl. large-scale integrated circuit, LSI) je dostigla vrhunac krajem 20. veka kroz izradu višeslojnih ULSI čipova (engl. ultra-large-scale integrated circuit), koji sadrže i do 10⁸ MOS tranzistora sa rezolucijom do čak 32nm. Nagrivanje poli-Si se tipično vrši pomoću RF ICP u atmosferi hlora a nagrivanje SiO₂ pomoću RF CCP u atmosferi fluora (C_xF_y), kao i pomoću dvofrekventnog CCP (Makabe, Yagisawa, 2011). Kao osnovni gas se koristi argon, čist ili u smeši sa

kiseonikom. Pored primena LTP u mikroelektronici, zanimljiva je i primena u proizvodnji tzv. mikroelektromehaničkih sistema (Esashi, Ono, 2005).

Minijaturizacija čipova uz povećanje broja MOS tranzistora na jednom poluprovodničkom uzorku dovela je do razvoja nanoelektronike i daleko šireg polja nanotehnologija (Fahrner et al., 2005), otvarajući nove mogućnosti za primene neravnotežnih niskotemperaturnih plazmi (Petrović et al., 2010; Esashi, Ono, 2005).

Pored nagrivanja, RF CCP se koristi za nanošenje tankih slojeva jedinjenja u pari hemijski reaktivnog gasa (engl. plasma chemical vapour deposition, PCVD). Kao tipičan primer može se navesti nanošenje tankog sloja (a-Si:H) na amorfnom silicijumu, u plazmi SiH₄/H₂ (Makabe, Petrović, 2015).

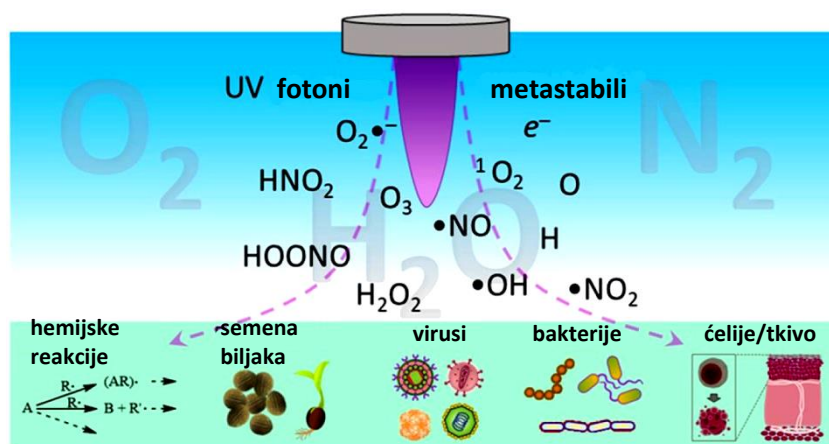
Raspršivanje i nanošenje tankih slojeva (engl. physical vapour deposition, PVD) metala vrši se pomoću DC magnetrona, sa čistim argonom kao osnovnim gasom i metalnom metom (Behrisch et al., 1981; Makabe, Petrović, 2015). Reaktivno raspršivanje je tehnika kojom se vrši nanošenje tankih slojeva oksida i nitrida (npr. Al₂O₃, Si₃N₄) u smeši argona sa nekim reaktivnim gasom (Ar/O₂ ili Ar/N₂).

2.2 Primena niskotemperaturnih plazmi na atmosferskom pritisku

U Odeljku 1.4 predstavljene su najvažnije karakteristike plazme na atmosferskom pritisku i opisane tehnike kojima se postiže kontrola stepena jonizacije i odstupanje od stanja lokalne termodinamičke ravnoteže. Termalna plazma na atmosferskom pritisku zahteva veliku snagu električnog izvora zbog utroška energije na grejanje gasa, dok je u smislu primena ograničena samo na slučajeve kada je nekom sistemu potrebno predati dovoljno energije za odvijanje određenih fizičkih ili hemijskih procesa (npr. elektrolučno zavarivanje metala).

U skladu sa tim, neravnotežno stanje plazme sa velikom razlikom u temperaturi elektrona (par eV) i teških čestica (10⁻²eV) predstavlja daleko povoljniji slučaj za primenu, pri čemu elektroni održavaju plazmu kroz ekscitacije i jonizacije a joni, metastabili i reaktivni neutrali mogu reagovati sa nekom sredinom/površinom kroz elementarne fizičke procese i hemijske reakcije. AP LTP od najvećeg značaja za primenu predstavljaju DBD pražnjenje i plazma mlaz, prikazani na Slikama 9 i 10. Kao osnovni gas najčešće se koristi helijum ili argon, čist ili u smeši sa kiseonikom kao

elektronegativnim gasom u cilju dodatne stabilizacije pražnjenja. Obzirom da se plazma dovodi u kontakt sa atmosferskim vazduhom određene relativne vlažnosti, razvija se veoma kompleksan hemijski sastav u vremenskim intervalima reda mikrosekundi od početka pražnjenja. Zbog prisustva hemijski reaktivnih kiseoničnih i azotnih jedinjenja (engl. reactive oxygen and nitrogen species, RONS), kao i niske temperature gasa ($\leq 40^\circ\text{C}$), AP LTP imaju široku primenu u poljoprivredi (tretman semena biljaka) i biomedicini (uništavanju virusa, bakterija i tretmanu živih ćelija i tkiva) (Graves et al., 2012). Na Slici 11. šematski su predstavljene najvažnije RONS (Gorbanev, Maldonado, Bogaerts, 2018).



Slika 11. Najvažnija azotna i kiseonična reaktivna jedinjenja (preuzeto iz: Gorbanev, Maldonado, Bogaerts, 2018, prevedeno na srpski).

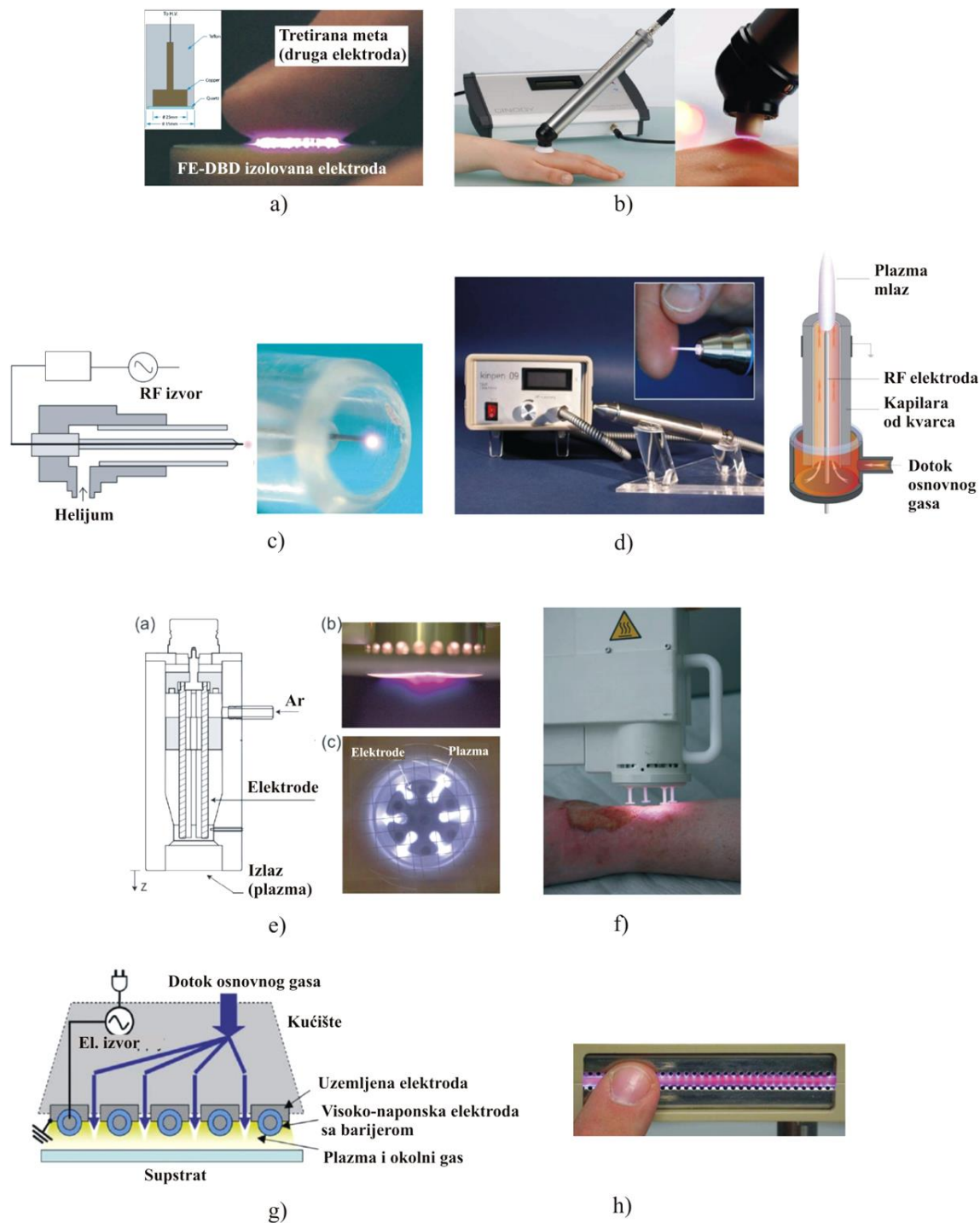
Niskotemperaturne plazme koje se primenjuju u biomedicini (engl. cold atmospheric plasmas, CAPs) mogu se podeliti u tri kategorije (Kong et al., 2009):

- “direktne plazme“: plazma je u direktnom kontaktu sa tkivom i ulogu druge elektrode igra površina tkiva dok struja protiče kroz telo. Kao tipičan primer može se navesti primena FE-DBD plazme (engl. floating electrode DBD) u dermatologiji i tretmanu drugih tkiva (Slika 12a,b).
- “indirektne plazme“: plazma nastaje u međuelektrodnom prostoru a zatim se protokom gasa dovodi u oblast gde deluje na tkivo. Kao tipični primeri mogu se navesti plazma igla (Slika 12c), plazma mlaz (Slika 12d) i plazmena baklja (Slika 12e-f).

- c) “hibridne plazme“: kombinacija prethodna dva slučaja, pri čemu jedna od elektroda ima daleko manju specifičnu otpornost od kože i provodi najveći deo struje, dok plazma difuzionim putem dolazi u kontakt sa tkivom. Kao tipičan primer može se navesti BCD plazma (engl. barrier coronal discharges, Slika 12g-h).

Kao najznačajnije primene CAPs u biomedicini mogu se izdvojiti:

- a) Sterilizacija tkiva. Za ovu svrhu koristi se FE-DBD plazma sa naponom 10 – 40kV. Struja pražnjenja mora imati nižu vrednost od optimalne za tretman živog tkiva i pražnjenje mora biti homogeno tj. bez izraženih filamenata koji bi mogli dovesti do lokalnih oštećenja. Snaga impulsnog (30 – 100ns) izvora je 3 – 5W dok je snaga po jedinici tretirane površine 0,5 – 1 W/cm². FE-DBD plazma ima takođe važnu primenu u ubrzavanju koagulacije krvi (Fridman et al., 2008b).
- b) Deaktivacija virusa i bakterija. Ova primena spada u oblast interakcije plazme sa prokariotskim ćelijama i pored biomedicine, postoji u poljoprivredi. Kao izvor plazme najčešće se koristi plazmena igla (Puač et al., 2006) ili kHz He/O₂ plazma mlaz (Deng, Shi, Kong, 2006).
- c) Lečenje rana i regeneracija tkiva. Pored DBD plazme, u ove svrhe se koristi i indirektna metoda primenom argonske plazmene baklje MicroPlaSter β (Heinlin et al., 2010). Takođe upotrebu imaju tzv. “plazoni“ u “hladnom modu“ - varijanta DC plazma mlaza u vazduhu sa visokom koncentracijom oksida NO koji igra ključnu ulogu u regeneraciji (Shekhter et al., 1998; Fridman et al., 2008b).
- d) Tretman kancerogenih ćelija. Predstavlja jednu od danas najaktuelnijih primena FE-DBD (Fridman et al., 2007) i plazma mlaza kINPen MED (Weltmann et al., 2009). Zasniva se na izazivanju ćelijske smrti (apoptoza) kod ćelija obolelih rakom, delovanjem plazme sa visokom koncentracijom kiseoničnih vrsta kao oksidacionih sredstava, posebno H₂O₂ (Graves et al., 2012; Metelmann et al., 2015).



Slika 12. CAPs u medicini: DBD (Fridman et al., 2008b; vonWoedtke, Metelmann and Weltmann, 2014) a-b), plazmena igla (Kieft, Laan, Stoffels, 2004) c), plazma mlaz (Weltmann et al., 2010) d), plazmena baklja (Shimizu et al., 2008; Heinlin et al., 2010) e-f), primer BCD plazme (Weltmann et al., 2010) g-h). Slike preuzete iz navedenih referenci, prevedeno na srpski.

3. PRORAČUN FUNKCIJE RASPODELE ELEKTRONA PO ENERGIJI I KOEFICIJENATA BRZINE ELEKTRONSKIH SUDARNIH PROCESA

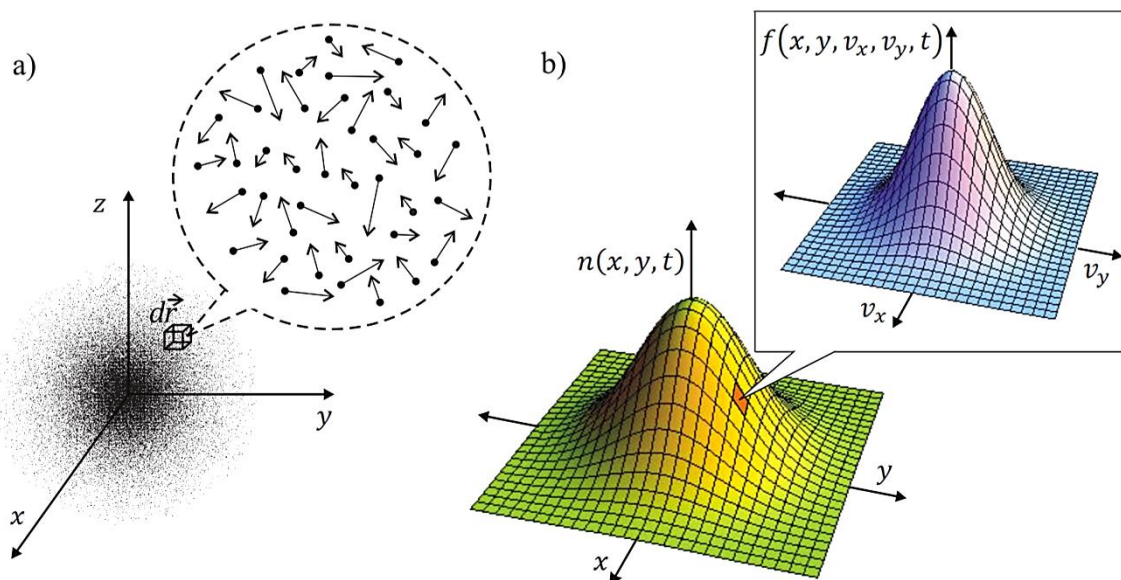
3.1 Funkcija raspodele čestica po položajima i brzinama; Transportni koeficijenti

Raspodela čestica nekog sistema po položajima u trenutku t opisana je poljem koncentracije $dN/dV = n(\vec{r}, t)$. U svakom elementu zapremine sistema čestice imaju različite brzine \vec{v} (Slika 13a) koje se, usled sudara, stohastično menjaju od trenutka do trenutka. Funkcija raspodele po položajima i brzinama $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ u faznom prostoru definiše se tako da proizvod:

$$dN_{\vec{r} \in [\vec{r}, \vec{r} + d\vec{r}], \vec{v} \in [\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v}]} = f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} d\vec{v}, \quad (9)$$

predstavlja broj čestica sa položajem $\vec{r} \in [\vec{r}, \vec{r} + d\vec{r}]$ i brzinom $\vec{v} \in [\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v}]$ (Makabe, Petrović, 2015; Lieberman, Lichtenberg, 2005). Iz definicije (9) sledi veza između $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ i $n(\vec{r}, t)$ (Slika 13b):

$$\frac{dN}{d\vec{r}} = n(\vec{r}, t) = \int_{\vec{v}} f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v}. \quad (10)$$



Slika 13. Ilustracija raspodele čestica po položajima i brzinama (primer izotropnih raspodela) a), raspodela po brzinama i veza sa raspodelom koncentracije Gausovog tipa za slučaj 2 dimenzije b).

Funkcija $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ predstavlja tzv. jednočestičnu redukovanu funkciju raspodele, izraženu preko faznih promenljivih samo jedne - bilo koje čestice sistema. Ova funkcija se dobija integracijom višečestične funkcije raspodele za sistem od N čestica $f(\vec{r}_1, \vec{v}_1, \vec{r}_2, \vec{v}_2, \dots, \vec{r}_N, \vec{v}_N, t)$ po faznim promenljivima za $N - 1$ čestica (Balescu, 1997; Milić, 1970). Navedena redukcija broja faznih promenljivih, uz pretpostavku da jednočestična funkcija raspodele dovoljno dobro opisuje ceo sistem, zasniva se na tzv. konceptu “molekularnog haosa“ u kojem se mogu zanemariti “korelacije“ između faznih promenljivih koje potiču od interakcija između čestica (Bogolybov, 1946; Hollinger et al., 1962). Pri uslovima kada je moguće svesti opis sistema preko jednočestične funkcije raspodele, za sistem se kaže da je u kinetičkom režimu a jednačina evolucije funkcije raspodele se naziva kinetičkom jednačinom.

Funkcija raspodele ima centralno mesto u kinetičkom opisu višečestičnog sistema zato što se parametri makrostanja, kao i transportni koeficijenti, dobijaju usrednjavanjem odgovarajućih veličina kojima se opisuje kretanje čestica u sistemu (Makabe, Petrović, 2015). Hidrodinamička brzina protoka $\vec{u}(\vec{r}, t)$ se može izračunati usrednjavanjem trenutne brzine čestica po funkciji raspodele:

$$\begin{aligned}\vec{u}(\vec{r}, t) &= \frac{1}{n(\vec{r}, t)} \int_{\vec{v}} \vec{v} f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} = \\ &= \langle \vec{v}_{dir} \rangle + \langle \vec{v}_r \rangle = \vec{v}_{dir} .\end{aligned}\quad (11)$$

U jednačini (11) \vec{v}_{dir} i \vec{v}_r predstavljaju komponente ukupne brzine čestice koje se odnose na direktno kretanje u nekom pravcu i haotično (engl. random) kretanje, pri čemu je tipično $|\vec{v}_r| \gg |\vec{v}_{dir}|$ ali $\langle \vec{v}_r \rangle = 0$. Hidrodinamička brzina istovremeno predstavlja i brzinu drifta \vec{v}_d za slučaj rojeva čestica. Srednja energija po jednoj čestici sistema i temperatura sistema mogu se izračunati usrednjavanjem kinetičke energije:

$$\begin{aligned}\langle \varepsilon(\vec{r}, t) \rangle &= \frac{1}{n(\vec{r}, t)} \int_{\vec{v}} \frac{1}{2} m v^2 f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} = \frac{1}{2} m (v_{dir}^2 + \langle v_r^2 \rangle + 2 \langle \vec{v}_{dir} \cdot \vec{v}_r \rangle) = \\ &= \frac{1}{2} m v_{dir}^2 + \frac{1}{2} m \langle v_r^2 \rangle = \\ &= \frac{1}{2} m u^2(\vec{r}, t) + \frac{3}{2} k_B T(\vec{r}, t) \cong \frac{3}{2} k_B T(\vec{r}, t) .\end{aligned}\quad (12)$$

Tenzor pritiska se definiše relacijom (Lieberman, Lichtenberg, 2005):

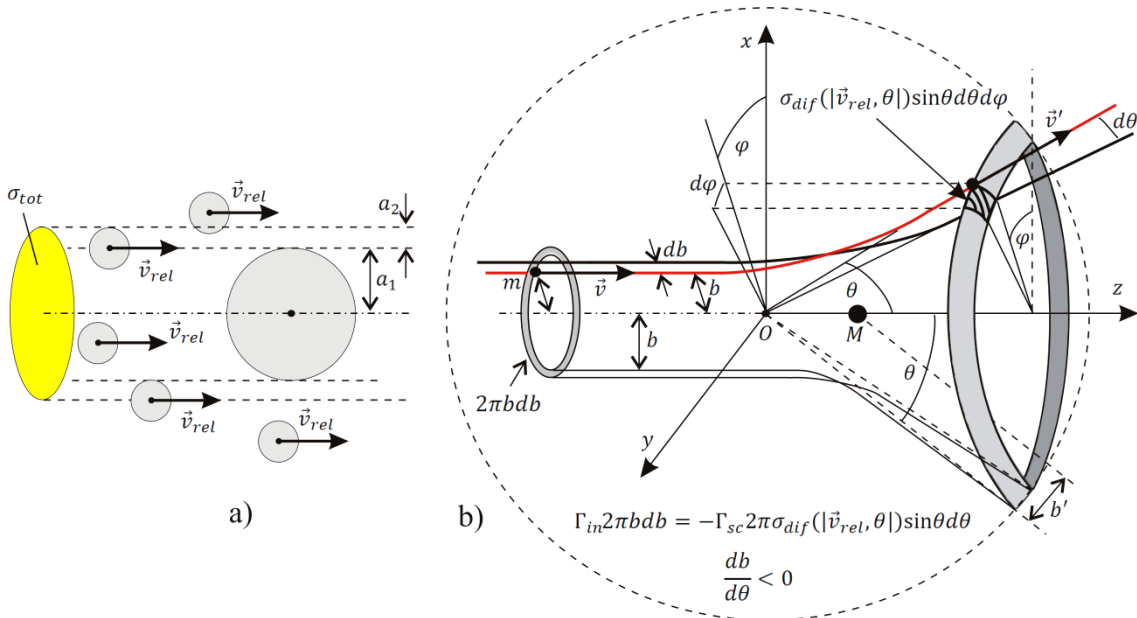
$$\Pi_{ij} = m \int_{\mathbf{v}} (v_i - u_i)(v_j - u_j) f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} \cong \frac{1}{3} mn(\vec{r}, t) \langle v_r^2 \rangle \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

a vektor toplotnog fluksa (energija koja se prenese termalnim kretanjem čestica u jedinici vremena kroz jedinicu površine normalne na pravac transporta):

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} m \int_{\mathbf{v}} (\vec{v} - \vec{u})^2 (\vec{v} - \vec{u}) f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v}. \quad (14)$$

3.2 Sudarni procesi; Totalni i diferencijalni presek za rasejanje

Pored parametara makrostanja i transportnih koeficijenata, definišu se veličine (Makabe, Petrović, 2015; Lieberman, Lichtenberg, 2005) kojima se opisuju procesi rasejanja (engl. scattering), odnosno sudari između čestica (Slika 14a,b). Na Slici 14a) $\vec{v}_{rel} = \vec{v} - \vec{V}$ predstavlja relativnu brzinu čestice projektila (brzine \vec{v}) u odnosu na česticu metu (brzine \vec{V}).



Slika 14. Geometrijska interpretacija totalnog preseka za rasejanje u modelu krutih sfera a), diferencijalni presek u klasičnoj teoriji rasejanja b).

Srednji slobodni put čestica projektila između dva uzastopna sudara sa česticama mete jednak je:

$$\lambda(v_{rel}) = \frac{1}{N\sigma_{tot}(v_{rel})}, \quad (15)$$

a kolizijska frekvencija (broj sudara u jedinici vremena) i srednje vreme između sudara:

$$\nu_{col}(v_{rel}) = \frac{1}{\tau_{col}(v_{rel})} = \frac{v_{rel}}{\lambda} = N\sigma_{tot}(v_{rel})v_{rel}. \quad (16)$$

Srednji slobodni put određuje fluks preostalih čestica projektila na mestu x , koji se smanjuje u odnosu na početni Γ_0 usled sudara sa česticama mete, $\Gamma(x) = \Gamma_0 \exp(-x/\lambda)$. U jednačinama (15)-(16) N predstavlja koncentraciju čestica mete a $\sigma_{tot}(v_{rel}) \sim \pi(a_1 + a_2)^2 [10^{-20} \text{m}^2]$ totalni presek za rasejanje u funkciji inteziteta relativne brzine čestice projektila u odnosu na česticu mete (Slika 14a):

$$\sigma_{tot}(v_{rel}) = 2\pi \int_0^\pi \sigma_{dif}(v_{rel}, \theta) \sin\theta d\theta. \quad (17)$$

U jednačini (17) θ je ugao rasejanja a $\sigma_{dif}(v_{rel}, \theta)$ predstavlja diferencijalni presek za rasejanje (Slika 14b). Pored totalnog preseka veliki značaj u opisu transportnih procesa ima presek za prenos impulsa (engl. momentum transfer):

$$\sigma_m(v_{rel}) = 2\pi \int_0^\pi \sigma_{dif}(v_{rel}, \theta) (1 - \cos\theta) \sin\theta d\theta. \quad (18)$$

Ukupna kolizijska frekvencija se dobija usrednjavanjem izraza (16) po brzinama čestica projektila i čestica meta na osnovu odgovarajućih raspodela $f_1(\vec{v})$ i $f_2(\vec{V})$ (Lieberman, Lichtenberg, 2005). Uz uslove normiranja $\int d\vec{v} f_1(\vec{v}) = \int d\vec{V} f_2(\vec{V}) = 1$, računa se pomoću izraza:

$$\nu_{col}^{uk} = N \int d\vec{v} \int d\vec{V} \sigma_{tot}(|\vec{v} - \vec{V}|) |\vec{v} - \vec{V}| f_1(\vec{v}) f_2(\vec{V}). \quad (19)$$

Ukoliko se ukupna kolizijska frekvencija normira na koncentraciju čestica mete, dobija se koeficijent brzine za taj proces rasejanja (engl. rate coefficient), koji predstavlja ukupan broj aktova rasejanja u jedinici vremena po jednoj čestici mete:

$$k = \frac{v_{col}^{uk}}{N} = \int d\vec{v} \int d\vec{V} \sigma_{tot}(|\vec{v} - \vec{V}|) |\vec{v} - \vec{V}| f_1(\vec{v}) f_2(\vec{V}). \quad (20)$$

Integrali (19)-(20) mogu se pojednostaviti u sistemu centra mase, posebno ukoliko je projektil čestica daleko manje mase, što jeste slučaj kod elektronskih sudarnih procesa u LTP. Takođe, $f_2(\vec{V})$ se može aproksimirati Maksvelovom raspodelom po brzinama na temperaturi gasa $f_M(\vec{V}) = (M/2\pi k_B T_g)^{3/2} \exp(-MV^2/2k_B T_g)$, koja je normirana na jedinicu $\int f_M(\vec{V}) d\vec{V} = 1$. U literaturi se definiše i Maksvel-Bolcmanova raspodela sa uslovom normiranja $\int f_{MB}(\vec{r}, \vec{V}, t) d\vec{V} = N(\vec{r}, t)$, gde je $N(\vec{r}, t)$ raspodela koncentracije čestica gasa, po analogiji sa definicijom (10):

$$F_{MB}(\vec{r}, \vec{V}, t) = N(\vec{r}, t) \left(\frac{M}{2\pi k_B T_g} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{MV^2}{2k_B T_g}\right). \quad (21)$$

Relativna brzina elektrona u odnosu na tešku česticu je približno jednaka brzini elektrona u laboratorijskom sistemu $v_{rel} \cong v$, dok je redukovana masa sistema približno jednaka masi elektrona $\mu = m_e M / (m_e + M) \cong m_e$. Obzirom da se centar mase približno nalazi na mestu teške čestice, integral (20) se može pojednostaviti integracijom po $d\vec{V}$ a zatim preći na integraciju po energiji elektrona na osnovu $\mu v_{rel}^2 / 2 \cong m_e v^2 / 2 = \varepsilon$:

$$k = \sqrt{2/m_e} \int_{\varepsilon_{thr}}^{+\infty} \sigma_{tot}(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} f_e(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (22)$$

U izrazu (22) ε_{thr} predstavlja energijski prag u slučaju neelastičnog procesa a $f_e(\varepsilon)$ funkciju raspodele elektrona po energiji (EEDF), normiranu na jedinicu $\int f_e(\varepsilon) d\varepsilon = 1$ (Makabe, Petrović, 2015).

Preseci za rasejanje se mogu dobiti proračunom (Branchett, Tennyson, Morgan, 1991; Morgan, Tennyson, 1993; Morgan, Gillan, Tennyson, Chen, 1997; Kushner et al., 2009), i putem merenja, pri čemu posebno treba spomenuti eksperimente sa rojevima elektrona gde se preseci dobijaju na osnovu merenih transportnih koeficijenata (Petrović et al., 1997; Petrović et al., 2009), kao i eksperimente sa snopovima elektrona (Itikawa et al., 2005; Itikawa et al., 2006; Itikawa et al., 2009).

3.3 Bolcmanova kinetička jednačina za elektrone u slabojonizovanoj niskotemperaturnoj plazmi; Model roja elektrona

U slučaju niskotemperaturne plazme najveći značaj ima jednočestična funkcija raspodele elektrona po brzini/energiji, obzirom da se jonizacija neutrala odigrava elektronskim udarom, dok je koncept “molekularnog haosa“ zadovoljen zbog niskog stepena jonizacije ($\chi \cong 10^{-5} - 10^{-6}$). Koliziorna frekvencija $e - e$ sudara je daleko manja u odnosu na kolizionu frekvenciju $e - n$ sudara, što dovodi do toga da se korelacije između različitih elektrona mogu zanemariti odnosno može se smatrati da se svi elektroni, međusobno nezavisno, sudaraju samo sa molekulima gasa. Funkcija raspodele elektrona se može proračunati numeričkim rešavanjem Bolcmanove kinetičke jednačine (Makabe, Petrović, 2015; Lieberman, Lichtenberg, 2005):

$$\frac{\partial f_e(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f_e(\vec{r}, \vec{v}, t) + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} f_e(\vec{r}, \vec{v}, t) = J_{coll}(f_e, F). \quad (23)$$

U (23) $J_{coll}(f_e, F)$ predstavlja kolizioni operator koji opisuje promenu funkcije raspodele elektrona usled sudara sa molekulima gasa a $F = F(\vec{r}, \vec{V}, t)$ funkciju raspodele molekula gasa koja se može aproksimirati MB raspodelom (21). Za elastične $e - n$ sudare koji imaju najveću frekvenciju uzima se Bolcmanov kolizioni član u obliku (Lieberman, Lichtenberg, 2005):

$$J_{coll}(f_e, F) = \int d\vec{V} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} (f'_e F'_{MB} - f_e F_{MB}) v \sigma_{dif}(v, \theta) \sin\theta d\theta, \quad (24)$$

pri čemu je $\sigma_{dif}(v, \theta)$ diferencijalni presek za rasejanje a $v \cong v_{rel} = |\vec{v} - \vec{V}|$ intezitet relativne brzine elektrona u odnosu na molekul gasa.

Roj elektrona predstavlja skup elektrona koji se kreće kao kolektiv (driftuje) kroz gas usled delovanja električnog polja, ali nema interakcije između elektrona i njihovo kretanje je određeno sudarima samo sa molekulima gasa (Petrović et al., 1997). Ukoliko je energija koju elektroni dobijaju od električnog polja dovoljna da nadoknadi gubitke u sudarima, roj se nalazi u tzv. “hidrodinamičkom režimu“. U hidrodinamičkom režimu karakteristike roja su u velikoj meri uniformne u prostoru sa malim gradijentom koncentracije, tako da je moguće razdvojiti raspodelu elektrona po položajima i

raspodelu po brzinama razvojem funkcije raspodele u red po stepenima gradijenta koncentracije (hydrodynamic description/density gradient expansion) (Kumar, Skullerud, Robson, 1980; Yousfi, Benabdessadok, 1996; Makabe, Petrović, 2015):

$$f_e(\vec{r}, \vec{v}, t) = g^0(\vec{v}, t)n(\vec{r}, t) + g^1(\vec{v}, t) \cdot \nabla_{\vec{r}}n(\vec{r}, t) + \dots = \sum_{k=0}^{+\infty} g^k(\vec{v}, t) \odot (\nabla_{\vec{r}})^k n(\vec{r}, t) \quad (25)$$

Koeficijenti $g^k(\vec{v}, t)$ u razvoju (25) su tenzori ranga k , sa opštim uslovom normiranja:

$$\int g^k(\vec{v}, t) d\vec{v} = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases} \quad (26)$$

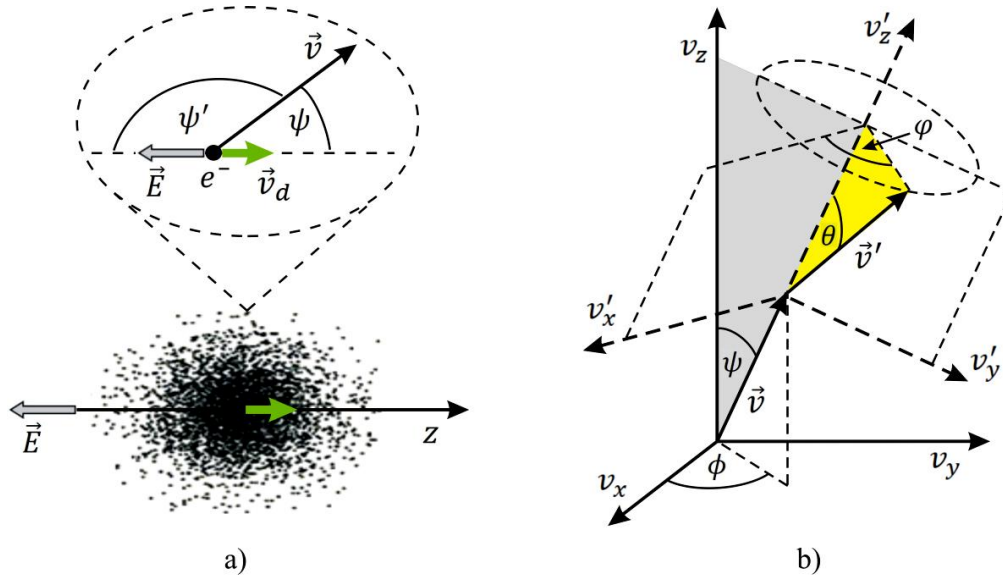
dok simbol \odot označava skalarni proizvod reda k . Obzirom da je brzina usmerenog kretanja elektrona u slabom električnom polju daleko manja od ukupne brzine elektrona usled haotičnog kretanja, može se pretpostaviti da su koeficijenti $g^k(\vec{v}, t)$ skoro izotropne raspodele po komponentama brzina i primeniti razvoj u red po sfernim harmonicima (Makabe, Petrović, 2015):

$$g^k(\vec{v}, t) = \sum_{l=0}^{+\infty} \sum_{m=-l}^{+l} g_{lm}^k(v, t) Y_{lm}(\psi, \phi), \quad (27)$$

tako da raspodele $g_{lm}^k(v, t)$ zavise samo od inteziteta brzine elektrona i vremena.

Neka je pravac i smer drifta roja elektrona određen z-osom, pri čemu je vektor električnog polja orijentisan suprotno od nje, $\vec{E} = -|E|\vec{e}_z$ (Slika 15a). Za polarni i azimutalni ugao u prostoru brzina odabrane su oznake ψ i ϕ kako bi se razlikovali od uglova rasejanja θ i φ (Slika 15b), tako da ψ predstavlja ugao između trenutne (ukupne) brzine elektrona i brzine drifta. Na Slici 15b) ukupna brzina elektrona predstavljena je u prostoru brzina (v_x, v_y, v_z) zbog razvoja gradijenta $\nabla_{\vec{v}}f_e(\vec{r}, \vec{v}, t)$ u Bolcmanovoj jednačini (23), pri čemu je v_z -osa u prostoru brzina kolinearna sa z-osom u koordinantnom prostoru (x, y, z) . Obzirom da se uglovi ψ, ϕ mogu tretirati kao uglovi rasejanja iz prethodnog akta rasejanja, može se pretpostaviti da pri kretanju elektrona važi azimutalna simetrija po ϕ analogno kao po φ . Kombinacijom razvoja (25) i (27) dobija se višečlani (engl. multiterm) razvoj funkcije raspodele elektrona (Dujko et al.,

2011a; Dujko et al., 2011b; Makabe, Petrović, 2015), na osnovu kojeg se iz Bolcmanove jednačine (23) dobija sistem jednačina za određivanje raspodela $g_{lm}^k(v, t)$.



Slika 15. Ilustracija roja elektrona koji driftuje duž z-ose u slabom električnom polju a), promena brzine elektrona sa \vec{v} na \vec{v}' prilikom rasejanja na teškoj čestici b).

3.4 Aproksimacija dva člana za proračun funkcije raspodele elektrona po brzini

U slabom električnom polju može se pretpostaviti da su karakteristike roja u prostoru skoro uniformne, sa malim gradijentom koncentracije orijentisanim duž z-ose (pravac polja i drifta). Shodno tome, u razvoju (25) u prvoj aproksimaciji zadržava se samo nulti član $g^0(\vec{v}, t)n(z, t)$, gde $g^0(\vec{v}, t)$ predstavlja funkciju raspodele elektrona po brzinama za koju se pretpostavlja da je ista u svakoj tački roja. U daljem tekstu za nju će biti usvojena oznaka $f_e(\vec{v}, t)$. Takođe, u razvoju (27) za $g^0(\vec{v}, t)$ tj. $f_e(\vec{v}, t)$ može se zbog azimutalne simetrije po uglu ϕ (Slika 15a,b) preći na razvoj samo po Ležandrovim polinomima $P_l(\cos\psi)$ (Pitchford, Phelps, 1981):

$$f_e(\vec{v}, t) = \sum_{l=0}^{+\infty} f_l(v, t) P_l(\cos\psi). \quad (28)$$

Aproksimacija dva člana (engl. two-term approximation, TTA) se sastoji u zadržavanju samo prva dva člana u razvoju (28), nulti koji predstavlja izotropnu funkciju raspodele po intezitetu brzine elektrona i prvi koji predstavlja popravku (Pitchford, Phelps, 1981):

$$f_e(\vec{v}, t) = f_0(v, t) + f_1(v, t)\cos\psi, \quad (29)$$

ili u opštem slučaju, na osnovu (25) $f_e(\vec{r}, \vec{v}, t) = f_e(\vec{v}, t)n(z, t)$ (Hagelaar, Pitchford, 2005; Lieberman, Lichtenberg, 2005):

$$\begin{aligned} f_e(v, \cos\psi, z, t) &= f_0(v, t)n(z, t) + f_1(v, t)n(z, t)\cos\psi = \\ &= f_0(v, z, t) + f_1(v, z, t)\frac{v_z}{v}. \end{aligned} \quad (30)$$

Razvoju (30) može se dati fizička interpretacija ukoliko se uvede ugao između brzine elektrona i vektora električnog polja $\psi' = \pi - \psi = -\arccos(v_z/v)$ (Slika 15a). Redefinisanjem $f_1'(v, t) = -f_1(v, t)$ sledi zaključak da prva popravka $f_1'(v)\cos\psi' = f_1(v)\cos\psi$, koja uvodi anizotropiju u funkciji raspodele $f_e(\vec{v})$, potiče upravo od drifta odnosno uticaja električnog polja. Funkcija raspodele (30) je normirana na osnovu uslova:

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin\psi d\psi \int_0^{+\infty} v^2 dv f_e = 4\pi \int_0^{+\infty} v^2 f_0 dv = n(z, t). \quad (31)$$

U radovima (Pitchford, Phelps, 1981; Pitchford, Phelps, 1982) prikazano je poređenje EEDF izračune u aproksimaciji dva člana i izračunate sa razvojem od 6 članova, za slučaj $\nabla_{\vec{r}}f_e = 0$ i $\partial f_e/\partial t = 0$. Rezultati su takođe poređeni sa Monte Karlo proračunom za roj elektrona u N_2 na 100Td. U radu (Petrović et al., 2007) prikazano je poređenje EEDF izračunate u aproksimaciji dva člana sa Monte Karlo proračunom za roj elektrona u NO na 10Td. Više detalja o primenljivosti aproksimacije dva člana u proračunu funkcije raspodele po energiji za rojeve elektrona u LTP može se naći u (White, Robson, Schmidt, Morrison, 2003).

U cilju detaljnije analize rezultata publikovanih u radovima (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018; Gocić, Mladenović, 2018; Mladenović, Gocić, Petrović, 2019) u narednim Odeljcima 3.5-3.9 navedeni su najvažniji elementi koji se odnose na proračun funkcije raspodele elektrona u aproksimaciji dva člana. Više detalja može se naći u korišćenoj literaturi (Hagelaar, Pitchford, 2005; Lieberman, Lichtenberg, 2005).

3.5 Bolcmanov kolizioni član u aproksimaciji dva člana i veza sa presekom za prenos impulsa

Za $M \rightarrow \infty$ teška čestica nema uzmak prilikom rasejanja elektrona i važi $v' = v$ (Slika 14b), kao i $F'_{MB} = F_{MB}$ uz uslov normiranja $\int d\vec{V} F_{MB} = N$. U (29)-(30) takođe važi $f'_0 = f_0$, $f'_1 = f_1$ (Lieberman, Lichtenberg, 2005). Neka je najpre $\psi = 0$ odnosno neka su na Slici 15b) v_z -osa i v'_z -osa kolinearne tako da važi $v_z = v$. Elektron se rasejava na neutralu pod uglom θ tako da je nakon sudara $v'_z = v' \cos\theta = v \cos\theta$. U tom slučaju kolizioni član (24) na osnovu raspodele (30) dobija oblik:

$$\begin{aligned} J_{coll}(f_e, F) &= 2\pi N \int_0^\pi \left(f'_0 + \frac{v'_z}{v'} f'_1 - f_0 - \frac{v_z}{v} f_1 \right) v \sigma_{dif}(v, \theta) \sin\theta d\theta = \\ &= 2\pi N \int_0^\pi f_1(v) v (\cos\theta - 1) \sigma_{dif}(v, \theta) \sin\theta d\theta = \\ &= -v_m(v) f_1(v). \end{aligned} \quad (32)$$

U (32) $v_m(v)$ na osnovu (18) predstavlja kolizionu frekvenciju za elastični prenos impulsa:

$$v_m(v) = 2\pi N v \int_0^\pi (1 - \cos\theta) \sigma_{dif}(v, \theta) \sin\theta d\theta = N v \sigma_m(v), \quad (33)$$

što stavlja akcenat na presek za prenos impulsa u odnosu na presek za elastično rasejanje prilikom rešavanja Bolcmanove jednačine (23) u aproksimaciji dva člana. Razlika između ovih preseka koja potiče od normiranja na faktor $(1 - \cos\theta)$ može imati izražen uticaj na EEDF zato što su procesi elastičnog rasejanja elektrona na neutralima u niskotemperaturnim plazmama mnogo češći u odnosu na neelastične procese (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

Ukoliko je $\psi \neq 0$, može se pokazati (Holt, Haskel, 1965, Odeljak 10.13) da se umesto (32) dobija:

$$J_{coll}(f_e, F) = -v_m(v) f_1(v) \cos\psi. \quad (34)$$

Konačno, ukoliko neutrali imaju konačnu masu ne može se uvesti pretpostavka $f'_0 = f_0$ i može se pokazati da kolizioni član ima oblik (Smirnov, 2001, str. 132-134):

$$J_{coll}(f_e, F) = J_{coll}(f_0) + J_{coll}(f_1) = \\ = \frac{m_e}{M} \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} \left[v^3 v_m(v) \left(f_0 + \frac{eT_g}{mv} \frac{\partial f_0}{\partial v} \right) \right] - v_m(v) f_1(v) \cos\psi. \quad (35)$$

Prvi član sa desne strane jednačine (35) u literaturi se obeležava sa C_{e0} ili C_0 (Hagelaar, Pitchford, 2005; Lieberman, Lichtenberg, 2005).

3.6 Kolizioni članovi za neelastične procese

Pored kolizionog člana (35) prilikom rešavanja Bolcmanove jednačine moraju se uračunati kolizioni članovi koji se odnose na neelastične procese (Lieberman, Lichtenberg, 2005). Za elektronske ekscitacije i deekscitacije član ima oblik:

$$C_{ex} = -v_{ex}(v) f_0(v, z, t) + \frac{v'}{v} v_{ex}(v') f_0(v', z, t), \quad (36)$$

gde je $v' = \sqrt{v^2 + 2e\varepsilon_{ex}^{thr}/m_e}$ (ε_{ex}^{thr} je prag neelastičnog procesa i u slučaju deekscitacije je negativan) a $v_{ex} = n_g \sigma_{ex}(v)v$ koliziona frekvencija. Prvi član u jednačini (36) uračunava efekte rasejanja pri kojima elektroni menjaju brzinu sa v na v' ("scattering-out"), a drugi pri kojima menjaju sa v' na v ("scattering-in"). Za vibracione/rotacione ekscitacije:

$$C_{vib} = \frac{e\varepsilon_{vib/rot}^{thr}}{m_e v^2} \frac{\partial}{\partial v} [v_{vib/rot}(v) v f_0(v, z, t)], \quad (37)$$

gde je $\varepsilon_{vib/rot}^{thr}$ prag a $v_{vib/rot} = n_g \sigma_{vib/rot}(v)v$ koliziona frekvencija procesa. Izraz (37) dobija se razvojem (36) u Tejlorov red po $v' - v \cong e\varepsilon_{vib/rot}^{thr}/m_e v$.

Kolizioni član za jonizacije ima oblik:

$$C_{ion} = -v_{ion}(v) f_0(v, z, t) + \frac{4v'}{v} v_{ion}(v') f_0(v', z, t), \quad (38)$$

gde prvi i drugi član u (38) opisuju efekte "scattering-out" i "scattering-in" po analogiji sa (36), $v' = \sqrt{2v^2 + 2e\varepsilon_{ex}^{thr}/m_e}$ (ε_{ion}^{thr} je prag za jonizaciju) a $v_{ion} = n_g \sigma_{ion}(v)v$

kolizijska frekvencija. Faktor 4 se javlja zbog pretpostavke da je energija $\varepsilon - \varepsilon_{ion}^{thr}$ podjednako raspodeljena između upadnog i nastalog elektrona nakon rasejanja.

Konačno, kolizijski član za zahvat elektrona se računa u obliku:

$$C_{att} = -v_{att}(v)f_0(v, z, t), \quad (39)$$

i opisuje smanjenje broja elektrona sa brzinama v koji nestaju u zahvatima ($v_{att}(v) = n_g \sigma_{att}(v)v$ je odgovarajuća kolizijska frekvencija).

Pored navedenih, može biti uračunat i kolizijski član za kulonovske (elastične) $e - e$ sudare (Lieberman, Lichtenberg, 2005) u cilju analize efekata maksvelizacije na EEDF pri većim koncentracijama elektrona tj. većem stepenu jonizacije.

3.7 Boltzmanova jednačina za elektrone u aproksimaciji dva člana

U Boltzmanovoj jednačini mogu se najpre uračunati samo elastični sudari na osnovu (35). Kako je električno polje orijentisano suprotno od z-ose (Slika 15a), uvodi se pretpostavka da važi $\nabla_{\vec{r}} f_e \cong (\partial f_e / \partial z) \vec{e}_z$. Kako je $v_z = v \cos \psi$, $\vec{a} = -e\vec{E}/m_e$ i $J_{coll}(f_e, F) = C_0 - v_m(v)f_1(v)\cos\psi$, Boltzmanova jednačina (23) dobija oblik (Lieberman, Lichtenberg, 2005):

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + v \cos \psi \frac{\partial f_e}{\partial z} - \frac{e\vec{E}}{m_e} \cdot \nabla_{\vec{v}} f_e = C_0 - v_m(v)f_1(v)\cos\psi. \quad (40)$$

Treći član sa leve strane jednačine (40) se može transformisati ukoliko se gradijent po komponentama brzina $\nabla_{\vec{v}} f_e$ razvije u sfernim koordinatama (v, ψ, ϕ) u prostoru brzina (Slika 15b). Korišćenjem veza između ortova Dekartovog i sfernog sistema (z-osa u koordinatnom prostoru i v_z -osa u prostoru brzina su kolinearne), $\vec{e}_z \cdot \vec{e}_v = \cos\psi$, $\vec{e}_z \cdot \vec{e}_\psi = -\sin\psi$, $\vec{e}_z \cdot \vec{e}_\phi = 0$ (Mušicki, Milić, 1978), kao i $\partial / \partial \psi = \frac{\partial}{\partial(\cos\psi)} \frac{\partial(\cos\psi)}{\partial \psi}$, dobija se:

$$\begin{aligned} \frac{e\vec{E}}{m_e} \cdot \nabla_{\vec{v}} f_e &= \frac{eE_z}{m_e} \vec{e}_z \cdot \left(\frac{\partial f_e}{\partial v} \vec{e}_v + \frac{1}{v} \frac{\partial f_e}{\partial \psi} \vec{e}_\psi + \frac{1}{v \sin \psi} \frac{\partial f_e}{\partial \phi} \vec{e}_\phi \right) = \\ &= \frac{eE_z}{m_e} \left(\cos \psi \frac{\partial f_e}{\partial v} + \frac{\sin^2 \psi}{v} \frac{\partial f_e}{\partial(\cos \psi)} \right), \end{aligned} \quad (41)$$

gde je $E_z = -|E|$. Na osnovu (30) i (41) jednačina (40) dobija oblik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_0}{\partial t} + \cos\psi \frac{\partial f_1}{\partial t} + v\cos\psi \frac{\partial f_0}{\partial z} + v\cos^2\psi \frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{eE_z}{m_e} \cos\psi \frac{\partial f_0}{\partial v} - \\ - \frac{eE_z}{m_e} \cos^2\psi \frac{\partial f_1}{\partial v} - \frac{eE_z \sin^2\psi}{m_e v} f_1 = C_0 - v_m(v) f_1(v) \cos\psi. \end{aligned} \quad (42)$$

Iz (42) može se dobiti sistem od dve diferencijalne jednačine po izotropnom delu f_0 i prvoj popravci f_1 funkcije raspodele elektrona (30) eliminacijom stohastične promenljive ψ . U tom cilju jednačinu (42) najpre treba pomnožiti faktorom $\sin\psi$ i sprovesti integraciju $\int_0^\pi d\psi$. Dobija se:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{v}{3} \frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{eE_z}{m_e} \frac{1}{3v^2} \frac{\partial}{\partial v} (v^2 f_1) = C_0. \quad (43)$$

Zatim jednačinu (42) treba pomnožiti faktorom $\sin\psi\cos\psi$ i sprovesti integraciju $\int_0^\pi d\psi$. Dobija se:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + v \frac{\partial f_0}{\partial z} - \frac{eE_z}{m_e} \frac{\partial f_0}{\partial v} = -v_m(v) f_1(v). \quad (44)$$

Sistem jednačina (43)-(44) predstavlja osnovni sistem jednačina za proračun funkcije raspodele elektrona po brzini u aproksimaciji dva člana (Lieberman, Lichtenberg, 2005).

3.8 Proračun funkcije raspodele elektrona po energiji pomoću programa BOLSIG+

Za potrebe modelovanja niskotemperaturnih plazmi neophodni su elektronski transportni koeficijenti, kao i koeficijenti brzine elektronskih sudarnih procesa. U Odeljcima 3.1 i 3.2 date su definicije ovih veličina i njihova veza sa funkcijom raspodele elektrona po brzini/energiji. Ovi koeficijenti se mogu izračunati numeričkim rešavanjem Bolcmanove kinetičke jednačine (23) za određeni set preseka elektronskih sudarnih procesa. U ovom Odeljku biće navedeni najvažniji elementi koji se odnose na proračun BE EEDF u aproksimaciji dva člana pomoću programa (BE solver) BOLSIG+, na osnovu koga su računati EEDF i koeficijenti brzine u radovima (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018; Gocić, Mladenović, 2018; Mladenović, Gocić, Petrović, 2019). Više detalja može se naći u (Hagelaar, Pitchford, 2005).

U sistemu jednačina (43)-(44) najpre je pogodno preći na zavisnost od energije elektrona u [eV], $\varepsilon = m_e v^2 / 2e$. Ukoliko se definiše konstanta $\gamma = \sqrt{2e/m_e}$ veza između promenljivih postaje $\varepsilon = v^2 / \gamma^2$. Na osnovu toga, korišćenjem $\frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} (v^2 f_1) = \frac{2}{\gamma \sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (\varepsilon f_1)$, kao i $\frac{\partial f_0}{\partial v} = \frac{2}{\gamma} \sqrt{\varepsilon} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon}$, dobija se polazni sistem jednačina u programskom paketu BOLSIG+ za proračun funkcije raspodele elektrona po energiji:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} + \frac{\gamma}{3} \sqrt{\varepsilon} \frac{\partial f_1}{\partial z} - \frac{\gamma}{3} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} (\varepsilon E_z f_1) = C_0, \quad (45)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \gamma \sqrt{\varepsilon} \frac{\partial f_0}{\partial z} - \gamma E_z \sqrt{\varepsilon} \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} = -v_m(\varepsilon) f_1(\varepsilon). \quad (46)$$

Prilikom proračuna ukupne kolizione frekvencije svi preseki $\sigma_k(\varepsilon)$ iz učitanoj seta preseka se normiraju na odgovarajuće molske udele komponenti plazme x_k u slučaju proračuna za smešu (Hagelaar, Pitchford, 2005):

$$v_m(\varepsilon) = N v \sigma_m = N \gamma \sqrt{\varepsilon} \sum_k x_k \sigma_k(\varepsilon). \quad (47)$$

Za elastično rasejanje $\sigma_k(\varepsilon)$ predstavlja efektivni presek za prenos impulsa na osnovu (32)-(33), dok za neelastična rasejanja $\sigma_k(\varepsilon)$ predstavlja totalni presek pod pretpostavkom da se u sudaru impuls elektrona ne prenosi.

U hidrodinamičkom režimu, na osnovu (30) može se u izotropnom i anizotropnom delu raspodele razdvojiti zavisnost po energiji, prostornoj koordinati z i vremenu:

$$f_{0,1}(\varepsilon, z, t) = \frac{1}{2\pi\gamma^3} F_{0,1}(\varepsilon) n_e(z, t), \quad (48)$$

tako da za $F_0(\varepsilon)$ na osnovu (31) važi uslov normiranja (Hagelaar, Pitchford, 2005):

$$\int_0^{+\infty} \sqrt{\varepsilon} F_0(\varepsilon) d\varepsilon = 1. \quad (49)$$

U literaturi se raspodela $F_0(\varepsilon)$, izražena u jedinici $[eV^{-3/2}]$, navodi i pod nazivom EEPF (engl. electron energy probability function), dok se EEDF odnosi na njen proizvod sa normalizacionim faktorom $\sqrt{\varepsilon}$. U daljem tekstu za $F_0(\varepsilon)$ biće ipak usvojen termin EEDF.

Zavisnost funkcije raspodele od koordinate z i vremena t je na osnovu (48) sadržana u koncentraciji elektrona $n_e(z, t)$. Lokalnu promenu koncentracije elektrona tokom vremena određuje srednja koliziona frekvencija svih nekonzervativnih procesa jonizacije i zahvata \bar{v} , na osnovu izraza (Hagelaar, Pitchford, 2005):

$$\frac{1}{n_e} \frac{dn_e}{dt} = \bar{v} = N\gamma \int_0^{+\infty} \left(\sum_{k=ion} x_k \sigma_k(\varepsilon) - \sum_{k=att} x_k \sigma_k(\varepsilon) \right) \varepsilon F_0(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (50)$$

Korišćenjem $f_{0,1}(\varepsilon, t) = (1/2\pi\gamma^3)F_{0,1}(\varepsilon)n_e(t)$, $dn_e/dt = \bar{v}n_e$ i izraza za v_m (47), na osnovu jednačine (46) dobija se veza između $F_1(\varepsilon)$ i $F_0(\varepsilon)$:

$$F_1(\varepsilon) = \frac{\gamma E_z \sqrt{\varepsilon}}{v_m + \bar{v}} \frac{\partial F_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \frac{E_z}{N} \frac{1}{\sigma_m + \frac{\bar{v}}{N\gamma\sqrt{\varepsilon}}} \frac{\partial F_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \frac{E_z}{N} \frac{1}{\tilde{\sigma}_m} \frac{\partial F_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}. \quad (51)$$

Ubacivanjem (51) u (45) dobija se finalna diferencijalna jednačina za EEDF $F_0(\varepsilon)$:

$$\begin{aligned} -\frac{\gamma}{3} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\left(\frac{E_z}{N} \right)^2 \frac{\varepsilon}{\tilde{\sigma}_m} \frac{\partial F_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right] + \frac{\bar{v}}{N} \sqrt{\varepsilon} F_0(\varepsilon) &= \sum_k \tilde{C}_{0,k} + \tilde{C}_{0,e} = \\ &= \frac{2\pi\gamma^3 \sqrt{\varepsilon}}{Nn_e} \left(\sum_i C_{0i}^{el} + \sum_j C_{0j}^{inel} + \sum_k C_{0k}^{ion} + \sum_l C_{0l}^{att} + C_0^{e-e} \right). \end{aligned} \quad (52)$$

Zbog deljenja sa Nn_e veličine $\tilde{C}_{0,k}$ i $\tilde{C}_{0,e}$ ne zavise od koncentracije teških čestica i koncentracije elektrona, za razliku od kolizionih članova iz jednačine (45). Član za elastično rasejanje ima oblik:

$$\tilde{C}_{0,k}^{el} = \gamma x_k \frac{2m_e}{M_k} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[\varepsilon^2 \sigma_k(\varepsilon) \left(F_0(\varepsilon) + \frac{k_B T_g}{e} \frac{\partial F_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) \right], \quad (53)$$

za ekscitacije/deekscitacije:

$$\tilde{C}_{0,k}^{inel} = -\gamma x_k [\varepsilon \sigma_k(\varepsilon) F_0(\varepsilon) - (\varepsilon + \varepsilon_{ex}^k) \sigma_k(\varepsilon + \varepsilon_{ex}^k) F_0(\varepsilon + \varepsilon_{ex}^k)], \quad (54)$$

jonizacije:

$$\tilde{C}_{0,k}^{ion} = -\gamma x_k [\varepsilon \sigma_k(\varepsilon) F_0(\varepsilon) - 2(2\varepsilon + \varepsilon_{ion}^k) \sigma_k(2\varepsilon + \varepsilon_{ion}^k) F_0(2\varepsilon + \varepsilon_{ion}^k)], \quad (55)$$

zahvate elektrona:

$$\tilde{C}_{0,k}^{att} = -\gamma x_k \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) F_0(\varepsilon), \quad (56)$$

i $e - e$ sudare:

$$\tilde{C}_0^{e-e} = \frac{e^2 \gamma}{24\pi\epsilon_0^2} \ln\Lambda \frac{n_e}{N} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left[3A_1 F_0(\epsilon) + 2(A_2 + \epsilon^{3/2} A_3) \frac{\partial F_0(\epsilon)}{\partial \epsilon} \right]. \quad (57)$$

U jednačini (57) $\ln\Lambda$ je Kulonov logaritam za $e - e$ sudare i $\Lambda = 12\pi(\epsilon_0 k_B T_e)^{3/2} / e^3 n_e^{1/2}$, $A_1(\epsilon) = \int_0^\epsilon u^{1/2} F_0(u) du$, $A_2(\epsilon) = \int_0^\epsilon u^{3/2} F_0(u) du$, $A_3(\epsilon) = \int_\epsilon^\infty F_0(u) du$.

Detalji numeričke procedure mogu se naći u (Hagelaar, Pitchford, 2005). U slučaju proračuna za AC polje, umesto DC polja u prethodnim jednačinama se koristi „efektivno“ DC polje na osnovu relacije (4).

3.9 Proračun transportnih koeficijenata i koeficijenata brzine elektronskih sudarnih procesa pomoću programa BOLSIG+

Transportni koeficijenti i koeficijenti brzine se proračunavaju numerički i njihove vrednosti tabeliraju u funkciji redukovanoog električnog polja E/N [Td] ili srednje energije elektrona $\langle \epsilon \rangle$ [eV]. Množenjem jednačine (45) faktorom $\sqrt{\epsilon}$, integraljenjem po energiji i kombinovanjem sa (46) dobijaju se izrazi za brzinu drifta v_d , pokretljivost μ i koeficijent difuzije D (Hagelaar, Pitchford, 2005):

$$v_d = \frac{\gamma}{3} \int_0^{+\infty} \epsilon F_1(\epsilon) d\epsilon, \quad (58)$$

$$\mu N = -\frac{\gamma}{3} \int_0^{+\infty} \frac{\epsilon}{\tilde{\sigma}_m} \frac{\partial F_0(\epsilon)}{\partial \epsilon} d\epsilon, \quad (59)$$

$$DN = \frac{\gamma}{3} \int_0^{+\infty} \frac{\epsilon}{\tilde{\sigma}_m} F_0(\epsilon) d\epsilon. \quad (60)$$

Korišćenjem $\epsilon^{3/2}$ umesto $\sqrt{\epsilon}$ nakon integraljenja jednačine (45) po energiji dobijaju se i koeficijenti koji figurišu u jednačini prenosa energije:

$$n_\epsilon = n(\epsilon) = n \int_0^{+\infty} \epsilon^{3/2} F_0(\epsilon) d\epsilon, \quad (61)$$

$$\Gamma_\varepsilon = n \frac{\gamma}{3} \int_0^{+\infty} \varepsilon^2 F_1(\varepsilon) d\varepsilon , \quad (62)$$

$$\mu_\varepsilon N = - \frac{\gamma}{3 \langle \varepsilon \rangle} \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon^2}{\tilde{\sigma}_m} \frac{\partial F_0(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} d\varepsilon , \quad (63)$$

$$D_\varepsilon N = \frac{\gamma}{3 \langle \varepsilon \rangle} \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon^2}{\tilde{\sigma}_m} F_0(\varepsilon) d\varepsilon . \quad (64)$$

Koeficijent brzine za k -ti proces rasejanja elektrona, na osnovu (22) i (49), računa se na osnovu jednačine:

$$k_k = \gamma \int_0^{+\infty} \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) F_0(\varepsilon) d\varepsilon . \quad (65)$$

Razlika između izraza (65) i (22) u faktoru $\sqrt{\varepsilon}$ potiče od definicije EEDF $F_0(\varepsilon)$ odnosno uslova normiranja (49). Takođe, numerička integracija se može sprovesti od $\varepsilon = 0$ zato što u slučaju neelastičnih procesa važi $\sigma_k(\varepsilon < \varepsilon_{thr}) = 0$, gde je ε_{thr} odgovarajući energijski prag.

4. MODELI PLAZME

Modelovanje plazme predstavlja važan pristup u izučavanju LTP (Alves, Bogaerts, Guerra, Turner, 2018), obzirom da rezultati modela upotpunjuju rezultate eksperimentalne dijagnostike pružajući prateću teoriju, ali takođe daju mogućnost da se predvidi uticaj različitih fizičkih/hemijskih parametara na sastav i parametre plazme, posebno pri uslovima koji su nedostupni za merenje. AP LTP imaju jako složen hemijski sastav (više desetina komponenti plazme) i veliki broj hemijskih procesa (hiljadu i više) koji se razvijaju u vremenskim intervalima reda nekoliko nanosekundi od početka pražnjenja. U slučaju RF polja vremenski korak u numeričkoj simulaciji mora biti manji od osnovnog perioda ($\sim 10\text{ns}$) u okviru kojeg dolazi do razvoja plazme (Makabe, Petrović, 2015). Sa druge strane, neki od procesa u plazmi imaju vremenske konstante od više desetina milisekundi (hemijske reakcije), ili čak sekundi (difuzija, protok), što zahteva veliku dinamiku do deset redova veličine pri rešavanju diferencijalnih jednačina za vremenski razvoj. Pored toga, obzirom da LTP izrazito odstupa od stanja LTE, neophodno je nekim numeričkim postupkom rešiti Bolemanovu jednačinu (23), posebno za slučaj elektrona, u cilju proračuna funkcije raspodele (9) koja u opštem slučaju zavisi od 7 promenljivih, kao i proračuna transportnih koeficijenata i koeficijenata brzine koji figurišu u parcijalnim diferencijalnim jednačinama za vremenski i prostorni razvoj. U tom slučaju, ukoliko se za svaku od 7 promenljivih usvoji niz od npr. 100 intervala, proračun jednočestične funkcije raspodele bi zahtevao numerički proračun nekih $100^7 = 10^{14}$ vrednosti (Alves, Bogaerts, Guerra, Turner, 2018). Prvi način za pojednostavljenje je redukcija broja promenljivih kroz smanjenje prostornih koordinata od značaja, na osnovu odgovarajućih prostornih simetrija razmatranog sistema. Uvođenjem hidrodinamičkog razvoja (25) i aproksimacije dva člana (30) broj promenljivih se višestruko smanjuje i stavlja akcenat na zavisnost funkcije raspodele samo od inteziteta brzine elektrona, odnosno energije. Međutim, treba biti obazriv jer razvoj po sfernim harmonicima (27)-(28) može dati nezadovoljavajuće rezultate, na primer za elektrone u prisustvu jakog elektromagnetnog polja, kada se model rojeva ne može primeniti. Ukoliko čestice interaguju sa elektromagnetnim poljem, koje može poticati od same plazme ili spoljašnjih izvora, Bolcmanova jednačina i diferencijalne jednačine modela moraju se rešavati

samousaglašeno sa Maksimalnim jednačinama odnosno Poissonovom jednačinom u odsustvu magnetnog polja.

Najvažniji modeli plazme u literaturi mogu se podeliti u tri grupe, čestični, fluidni i hibridni.

4.1 Čestični modeli

Čestični modeli (engl. particle models) se prevashodno koriste za modelovanje LTP na niskom pritisku, kada srednji slobodni put elektrona postaje uporediv sa karakterističnim dimenzijama sistema i dominiraju binarni sudari kao i interakcija čestica plazme sa površinom elektroda ili zidova komore za pražnjenje. U ovim modelima razmatraju se individualni sudari kroz numeričke tehnike Monte Karlo simulacije (MCs). Jedna od bitnih prednosti ovih modela ogleda se u činjenici da se ne mora uvesti nikakva pretpostavka o funkciji raspodele elektrona ili jona, odnosno MC kodovi kroz tretman pojedinačnih sudara daju mogućnost za indirektno ali egzaktno rešavanje Boltzmanove jednačine (Boeuf, Marode, 1982a,b; Dujko, White, Petrović, 2008). Zbog ove karakteristike čestični modeli se u literaturi navode i pod nazivom kinetički modeli. Najpoznatiji primer čestičnog modela je PIC-MCC (engl. Particle in Cell with Monte Carlo collisions) (Surendra, Graves, 1991; Turner, Hopkins, 1992; Vahedi, Birdsall, Lieberman, DiPeso, Rognlien, 1993).

4.2 Fluidni i hibridni modeli

Fluidni modeli (engl. fluid/continuum models) se prevashodno koriste za modelovanje LTP na višim pritiscima i zasnivaju se na pretpostavci o postojanju kontinuuma odnosno “neprekidne sredine”. Svaka komponenta plazme, elektroni, joni i neutrali, tretiraju se kao fluidi i za svaku komponentu potrebno je rešavati sistem hidrodinamičkih (fluidnih) jednačina – jednačina kontinuiteta (jednačina održanja mase), jednačina impulsa (kretanja) i jednačina energije. Iako zahtevaju daleko kraće vreme za numerički proračun u odnosu na PIC-MCC, fluidni modeli moraju sadržati program za numeričko rešavanje Boltzmanove jednačine zbog samousaglašenog proračuna neravnotežne EEDF i transportnih koeficijenata neophodnih za fluidne

jednačine. Takođe, fluidne jednačine moraju se rešavati samousaglašeno sa Maksvelovim jednačinama ili Poasonovom jednačinom (Robson, White, Petrović, 2005; White, Robson, Dujko, Nicoletopoulos, Li, 2009; Dujko, Markosyan, White, Ebert, 2013; Markosyan, Teunissen, Dujko, Ebert, 2015; Bošnjaković, Petrović, Dujko, 2016; Alves et al., 2007; Kim, Kwon, Yoon, 2007; Arslanbekov, Kolobov, 2003; Boeuf et al., 1987; Boeuf, Pitchford, 1994; Passchier, Goedheer, 1993; Bogdanov, Adams, Demidov, Kudryavtsev, Williamson, 2010; Rafatov, Bogdanov, Kudryavtsev, 2012; Kolobov, Arslanbekov, 2012; Sakiyama, Graves, Stoffels, 2008; Lin, Hung, Hwang, Smith, Yang, Wu, 2012).

Hibridni modeli (engl. hybrid models) predstavljaju kombinaciju čestičnih i fluidnih modela. Brzi elektroni tretiraju se MC tehnikom a fluidnim jednačinama se opisuju teške čestice i spori elektroni (Kushner et al., 2009; Bogaerts et al., 2009; Bogaerts, Gijbels, Goedheer, 1995; Bogaerts, Gijbels, 1997a,b; Bogaerts, Okhrimovskyy, Gijbels, 2002).

4.2.1 Fluidne jednačine kao momenti Bolcmanove kinetičke jednačine uz uključivanje nekonzervativnih sudarnih procesa

Fluidne jednačine za plazmu su parcijalne diferencijalne jednačine i predstavljaju tzv. momente Bolcmanove kinetičke jednačine (Milić, 1970; Chen, 1984; Balescu, 1997; Makabe, Petrović, 2015). To znači da se, za čestice (komponentu plazme) vrste α , fluidne jednačine mogu dobiti iz kinetičke jednačine (23) procesom usrednjavanja analognim onome u relacijama (10)-(12):

$$\begin{aligned} \int \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} d\vec{v}_\alpha + \int \vec{v}_\alpha \cdot \nabla_{\vec{r}_\alpha} f_\alpha d\vec{v}_\alpha + \frac{e_\alpha}{m_\alpha} \int (\vec{E} + \vec{v}_\alpha \times \vec{B}) \cdot \nabla_{\vec{v}_\alpha} f_\alpha d\vec{v}_\alpha = \\ = \sum_\beta \int J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha, \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} m_\alpha \int \vec{v}_\alpha \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} d\vec{v}_\alpha + m_\alpha \int \vec{v}_\alpha \vec{v}_\alpha \cdot \nabla_{\vec{r}_\alpha} f_\alpha d\vec{v}_\alpha + e_\alpha \int \vec{v}_\alpha (\vec{E} + \vec{v}_\alpha \times \vec{B}) \cdot \nabla_{\vec{v}_\alpha} f_\alpha d\vec{v}_\alpha = \\ = \sum_\beta \int m_\alpha \vec{v}_\alpha J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha, \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_\alpha}{2} \int v_\alpha^2 \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} d\vec{v}_\alpha + \frac{m_\alpha}{2} \int v_\alpha^2 \vec{v}_\alpha \cdot \nabla_{\vec{r}_\alpha} f_\alpha d\vec{v}_\alpha + \frac{e_\alpha}{2} \int v_\alpha^2 (\vec{E} + \vec{v}_\alpha \times \vec{B}) \cdot \nabla_{\vec{v}_\alpha} f_\alpha d\vec{v}_\alpha = \\ = \sum_\beta \int \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha, \end{aligned} \quad (68)$$

gde $J_{coll}^{\alpha\beta}$ predstavlja kolizioni član za sudar čestice vrste α sa česticama vrste β . Detaljan razvoj svih članova na levim stranama jednačina (66)-(68) može se naći u (Milić, 1970). U ovom Odeljku biće analizirane samo desne strane jednačina (66) i (68) u kojima figurišu kolizioni članovi, značajne za zasnivanje balansnih jednačina globalnih modela.

Ukoliko je neki sudar konzervativan po čestici vrste α odgovarajući integral u algebarskoj sumi na desnoj strani jednačine (66) jednak je nuli. Kao najjednostavniji primer konzervativnog procesa može se navesti elastično rasejanje elektrona ($\alpha = e$) na neutralu ($\beta = n$) sa kolizionim članom u obliku (33), $J_{coll}^{en} = -v_m(v_e) f_1(v_e) \cos\psi$. Kako je u sfernim koordinatama u prostoru brzina (Slika 15b) $d\vec{v}_e = v_e^2 \sin\psi dv_e d\psi d\phi$, sledi:

$$\int J_{coll}^{en} d\vec{v}_e = - \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{+\infty} dv_e v_e^2 v_m(v_e) f_1(v_e) \int_0^\pi \sin\psi \cos\psi d\psi = 0. \quad (69)$$

U slučaju nekonzervativnih procesa algebarska suma $\sum_\beta \int J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha$ opisuje vremensku promenu u koncentraciji čestica vrste α usled nastanka i nestanka u odgovarajućim fizičkim ili hemijskim procesima. Na primer, u slučaju zahvata elektrona ($\alpha = e$) na neutralu vrste β , sa kolizionim članom u obliku (38) $C_{att}^{e\beta} = -v_{att}(v_e) f_0(v_e)$, odgovarajući integral jednak je:

$$\begin{aligned} \int C_{att}^{e\beta} d\vec{v}_e &= - \int v_{att}(v_e) f_0(v_e) d\vec{v}_e = \\ &= v_{att}^{uk} n_e(z, t) = k_{att}^{e\beta} n_\beta(t) n_e(t), \end{aligned} \quad (70)$$

gde je $n_\beta(t)$ koncentracija neutrala vrste β . Izraz (70) sledi iz definicije ukupne kolizione frekvencije (19), kao i (20), uz uslov normiranja (31) i pretpostavku da je relativna brzina elektrona u odnosu na tešku česticu približno jednaka brzini elektrona i da za teške čestice važi Maksvelova raspodela po brzini. Po analogiji sa rezultatom (70)

sledi zaključak da će svaki integral $\int J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha$ biti izražen preko ukupne kolizione frekvencije procesa $\nu_{\alpha\beta}^{uk} = k_{\alpha\beta} n_\beta$, odnosno algebarska suma $\sum_\beta \int J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha$ jednaka je razlici članova koji predstavljaju tzv. “izvore” (engl. source/gain, S, G) i “ponore” (engl. loss, L) čestica vrste α :

$$\begin{aligned} \sum_\beta \int J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha &= \sum_\beta \int \nu_{\alpha\beta} f_\alpha d\vec{v}_\alpha = \sum_\beta \nu_{\alpha\beta}^{uk} n_\alpha = \\ &= S - L = \sum_\eta k_{\alpha\eta}^S n_\alpha n_\eta - \sum_\xi k_{\alpha\xi}^L n_\alpha n_\xi, \end{aligned} \quad (71)$$

gde su $k_{\alpha\eta}^S$ i $k_{\alpha\xi}^L$ koeficijenti brzine za sudare čestica $\alpha - \eta$ i $\alpha - \xi$. U algebarskoj sumi na desnoj strani jednačine (68) se po analogiji sa (71) dobija:

$$\begin{aligned} \sum_\beta \int \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} J_{coll}^{\alpha\beta} d\vec{v}_\alpha &= \sum_\beta \int \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2} \nu_{\alpha\beta} f_\alpha d\vec{v}_\alpha = \sum_\beta \nu_{\alpha\beta}^{uk} n_\alpha \varepsilon_{\alpha\beta} = \\ &= \sum_\beta k_{\alpha\beta}^{el} n_\alpha n_\beta \frac{2m_\alpha m_\beta}{(m_\alpha + m_\beta)^2} (\langle \varepsilon_\alpha \rangle - \langle \varepsilon_\beta \rangle) + \sum_\beta k_{\alpha\beta}^{inel} n_\alpha n_\beta \varepsilon_{\alpha\beta}^{thr}, \end{aligned} \quad (72)$$

gde je $\varepsilon_{\alpha\beta}$ energija koju čestica vrste α predaje čestici vrste β prilikom sudara. U izrazu (72) $k_{\alpha\beta}^{el}$ predstavlja koeficijent brzine za elastični sudar čestica vrste $\alpha - \beta$, $\langle \varepsilon_\alpha \rangle$ srednju energiju (12) čestice vrste α u jedinici [J], $\langle \varepsilon_\beta \rangle$ po analogiji srednju energiju čestice vrste β . Faktor $\delta = 2m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)^2$ određuje koji deo energije $\langle \varepsilon_\alpha \rangle$ čestica vrste α predaje čestici vrste β u elastičnom sudaru. U drugoj sumi $k_{\alpha\beta}^{inel}$ predstavlja koeficijent brzine neelastičnog procesa između čestica vrste $\alpha - \beta$ a $\varepsilon_{\alpha\beta}^{thr}$ odgovarajući energijski prag (formalno u jedinici [J]). Radi jednostavnijeg zapisa u okviru sume po vrstama čestica $\sum_\beta k_{\alpha\beta}^{inel} n_\alpha n_\beta \varepsilon_{\alpha\beta}^{thr}$ podrazumeva se suma po različitim neelastičnim procesima između čestica $\alpha - \beta$. Razvojem preostalih članova u jednačinama (66)-(68) (Milić, 1970; Lieberman, Lichtenberg, 2005) dobija se sistem fluidnih jednačina za čestice vrste α u plazmi:

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \nabla_{\vec{r}_\alpha} \cdot (\pm n_\alpha \mu_\alpha \vec{E} - D_\alpha \nabla_{\vec{r}_\alpha} n_\alpha) = \sum_\eta k_{\alpha\eta}^S n_\alpha n_\eta - \sum_\xi k_{\alpha\xi}^L n_\alpha n_\xi, \quad (73)$$

$$m_\alpha n_\alpha \left(\frac{\partial \vec{u}_\alpha}{\partial t} + (\vec{u}_\alpha \cdot \nabla_{\vec{r}_\alpha}) \vec{u}_\alpha \right) = -\nabla_{\vec{r}_\alpha} p_\alpha + e_\alpha n_\alpha (\vec{E} + \vec{u}_\alpha \times \vec{B}) - \sum_{\beta} \vec{R}_{\alpha\beta}, \quad (74)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (n_\alpha \langle \varepsilon_\alpha \rangle) + \text{div}_{\vec{r}_\alpha} \vec{q}_\alpha + \text{div}_{\vec{r}_\alpha} (n_\alpha \langle \varepsilon_\alpha \rangle \vec{u}_\alpha) + p_\alpha \nabla_{\vec{r}_\alpha} \cdot \vec{u}_\alpha = \\ & = \vec{j}_\alpha \cdot \vec{E} - \sum_{\beta} k_{\alpha\beta}^{el} n_\alpha n_\beta \frac{2m_\alpha m_\beta}{(m_\alpha + m_\beta)^2} (\langle \varepsilon_\alpha \rangle - \langle \varepsilon_\beta \rangle) - \sum_{\beta} k_{\alpha\beta}^{inel} n_\alpha n_\beta \varepsilon_{\alpha\beta}^{thr}. \end{aligned} \quad (75)$$

U jednačini (73) $\Gamma_\alpha = \pm n_\alpha \mu_\alpha \vec{E} - D_\alpha \nabla_{\vec{r}_\alpha} n_\alpha$ predstavlja ukupni fluks čestica vrste α (usled drifta i difuzije) a “ \pm ” se odnosi na pozitivno odnosno negativno naelektrisane čestice. U jednačini (74) $\vec{R}_{\alpha\beta}$ predstavljaju zapreminske gustine sila otpora protoku čestica vrste α koje potiču od sudara. U sumi $\sum_{\beta} \vec{R}_{\alpha\beta}$ najveći doprinos imaju članovi koji potiču od elastičnih sudara za prenos impulsa $m_\alpha n_\alpha v_{\alpha\beta}^m \vec{u}_{\alpha\beta}$, gde je $v_{\alpha\beta}^m$ kolizijska frekvencija a $\vec{u}_{\alpha\beta} = \vec{u}_\alpha - \vec{u}_\beta$ relativna brzina čestica vrste α u odnosu na čestice vrste β (Lieberman, Lichtenberg, 2005). U jednačinama (73)-(75) n_α , μ_α , D_α , \vec{u}_α , p_α , $\langle \varepsilon_\alpha \rangle$, \vec{j}_α i \vec{q}_α predstavljaju koncentraciju, pokretljivost, koeficijent difuzije, hidrodinamičku brzinu protoka, parcijalni pritisak, srednju energiju, gustinu struje i vektor toplotnog fluksa za čestice vrste α , respektivno, a \vec{E} i \vec{B} jačine električnog i magnetnog polja. Član $\vec{j}_\alpha \cdot \vec{E}$ predstavlja gustinu apsorbirane snage S_{abs} u jedinici $[\text{W}/\text{m}^3]$. Sistem jednačina (73)-(75) potrebno je najpre dopuniti kinetičkim jednačinama za proračun funkcija raspodele $f_\alpha(\vec{r}_\alpha, \vec{v}_\alpha, t)$, kao i transportnih koeficijenata i koeficijenata brzine u formi tabeliranih vrednosti u funkciji srednje energije/redukovanog električnog polja, što podrazumeva korišćenje kompletnog seta preseka $\sigma_{\alpha\beta}^{tot}(\varepsilon)$ za rasejanje. Ovi podaci se u slučaju elektrona mogu dobiti numeričkim rešavanjem Bolcmanove jednačine (58)-(65), dok se u slučaju teških čestica koriste merene vrednosti ili vrednosti dobijene na osnovu MB raspodele kao za idealan neutralni gas. Zatim, sistem treba dopuniti Maksvelovim jednačinama za proračun električnog i magnetnog polja. U odsustvu magnetnog polja sistem Maksvelovih jednačina zamenjuje se Poasonovom jednačinom:

$$\text{div}_{\vec{r}} \vec{E} = -\Delta_{\vec{r}} \varphi = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{\alpha} e_\alpha n_\alpha. \quad (76)$$

Ukupna gustina kondukcijske struje može se izraziti algebarskim zbirom doprinosa svih pozitivnih i negativnih čestica:

$$\vec{j} = \sum_{\alpha} \vec{j}_{\alpha} = \sum_{\alpha} e_{\alpha} n_{\alpha} \vec{u}_{\alpha} . \quad (77)$$

Za vektor toplotnog fluksa često se koristi Furijeov zakon provođenja toplote:

$$\vec{q}_{\alpha} = -K_{T\alpha} \nabla_{\vec{r}_{\alpha}} T_{\alpha} , \quad (78)$$

gde je $K_{T\alpha}$ koeficijent toplotne provodnosti za čestice vrste α . Pritisak se u slučaju LTP često koristi u obliku $p_{\alpha} \cong \frac{1}{3} m_{\alpha} n_{\alpha} \langle (\vec{v}_{\alpha} - \vec{u}_{\alpha})^2 \rangle_{\vec{v}_{\alpha}}$ na osnovu (13), kao za idealan neutralni gas (Lieberman, Lichtenberg, 2005).

4.3 Globalni modeli

Globalni modeli predstavljaju prostorno usrednjene modele, odnosno zasnivaju se na balansnim jednačinama za koncentracije i srednje energije čestica koje se dobijaju iz jednačina fluidnog modela izostavljanjem prostornih gradijenata (Hurlbatt et al., 2017; Alves, Bogaerts, Guerra, Turner, 2018). Drugim rečima, u globalnim modelima karakteristike plazme proračunavaju se u jednoj tački (lokalno), usled čega se u literaturi navode i kao 0D modeli, iako postoje i 1D globalni modeli čiji rezultati predstavljaju rezultate 0D modela dobijene u nekoliko uzastopnih tačaka sistema od značaja u kojima vladaju drugačiji uslovi (van Gaens, Bogaerts, 2013). Prostorno usrednjavanje omogućuje brz proračun parametara i sastava plazme, pri čemu je glavna pogodnost u mogućnosti da se prati vrlo kompleksni hemijski sastav sa velikim brojem uključenih procesa (hiljadu i više). Međutim, kao i fluidni, globalni model zahteva proračun EEDF za konkretne uslove u modelovanoj niskotemperaturnoj plazmi, zbog korektnog određivanja koeficijenata brzine koji figurišu u sistemu balansnih jednačina i mogu bitno uticati na njihov finalni rezultat (Turner et al., 2015; Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). U literaturi se mogu naći rezultati globalnih modela za pražnjenje u Ar (Ashida, Lee, Lieberman, 1995), O₂ (Kim, Lieberman, Lichtenberg, Gudmundsson, 2006), kao i za smeše: He/O₂ (Park, Lee, Kim, Lee, 2008; Park, Hong, Lee, Sim, Lee, 2010; Liu, Rong, Wang, Iza, Kong, Bruggeman, 2010), He/H₂O (Bruggeman, Schram, 2010; Liu, Bruggeman, Iza, Rong, Kong, 2010), He/O₂/H₂O i He/vlažni vazduh (Norberg, Johnsen, Kushner, 2015; Stalder, Vidmar, Nersisyan, Graham, 2006; Liu, Iza, Wang, Kong, Rong, 2011; Sakiyama, Graves, Chang, Shimizu, Morfill, 2012; Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a; Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018; Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013b; Gocić, Mladenović, 2018; Schröter et al., 2018b; Sun et al., 2019a; Sun et al., 2019b), Ar/O₂ (Park, Lee, Kim, Lee, 2008; Gudmundsson, Thorsteinsson, 2007), Ar/O₂/N₂/H₂O (van Gaens, Bogaerts, 2013), CH₄ (Yang et al., 2003), kao i za interakciju plazme sa tečnom vodom (Bruggeman et al., 2016) i modifikaciju površina (Dorai, Kushner, 2003). Postoje i gotovi programski paketi na bazi globalnog modela pomoću kojih se može vršiti proračun koncentracija komponenata plazme i elektronske temperature za zadatau smešu i set hemijskih procesa, GlobalKin (Dorai, Hassouni, Kushner, 2000;

Stafford, Kushner, 2004) i ZDPlasKin (<http://www.zdplaskin.laplace>). Pored toga, u literaturi ima publikovanih rezultata globalnih modela za slučaj drugih smeša, sa malim brojem uključenih reakcija, u cilju opisivanja neravnotežne raspodele naseljenosti vibraciono pobuđenih stanja u N₂ (Loureiro, Ferreira, Capitelli, Gorse, Cacciatore, 1990), nestabilnosti u induktivnim pražnjenjima na niskom pritisku u Ar ili Ar/SF₆ (Chabert, Lichtenberg, Lieberman, Marakhtanov, 2001), kao i procesa u jonskim ubrzavačima sa pražnjenjem u Xe (Chabert, Monreal, Bredin, Popelier, Aanesland, 2012).

4.3.1 Balansne jednačine globalnog modela

Obzirom da je u globalnom modelu cilj proračunati karakteristike plazme lokalno, jednačine (73)-(75) treba modifikovati tako da opisuju balanse prostorno usrednjenih vrednosti odgovarajućih fizičkih veličina u jednoj tački sistema (Hurlbatt et al., 2017). To se postiže eliminacijom svih prostornih izvoda i eliminacijom jednačine impulsa (74) iz sistema (efekti protoka se mogu naknadno uračunati u formi konstantnih članova). Drugim rečima, 0D globalni model zasniva se na dva tipa balansnih jednačina – jednačina balansa broja čestica:

$$\frac{\partial n_{\alpha}}{\partial t} = \sum_{\eta} k_{\alpha\eta}^S n_{\alpha} n_{\eta} - \sum_{\xi} k_{\alpha\xi}^L n_{\alpha} n_{\xi}, \quad (79)$$

i jednačina balansa srednje energije svih čestica vrste α , $n_{\alpha}\langle\varepsilon_{\alpha}\rangle$ [m⁻³]]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(n_{\alpha}\langle\varepsilon_{\alpha}\rangle) = \vec{j}_{\alpha} \cdot \vec{E} - \\ - \sum_{\beta} k_{\alpha\beta}^{el} n_{\alpha} n_{\beta} \frac{2m_{\alpha}m_{\beta}}{(m_{\alpha} + m_{\beta})^2} (\langle\varepsilon_{\alpha}\rangle - \langle\varepsilon_{\beta}\rangle) - \sum_{\beta} k_{\alpha\beta}^{inel} n_{\alpha} n_{\beta} \varepsilon_{\alpha\beta}^{thr}. \end{aligned} \quad (80)$$

Sistem jednačina (79)-(80) predstavlja polazni sistem spregnutih nelinearnih diferencijalnih jednačina 0D globalnog modela i može se, u zavisnosti od konkretnog tipa LTP i uslova, modifikovati uračunavanjem dodatnih članova.

Na atmosferskom pritisku tročestični procesi dolaze do izražaja i treba uračunati i njihove prinose u jednačini (79). Efekti protoka i difuzije čestica mogu izazvati lokalnu promenu koncentracije tokom vremena. Ukoliko u modelovanom sistemu

postoje fluksevi čestica ka zidu, u jednačini (79) moraju biti uzeti u obzir. Na osnovu svega navedenog, opšti oblik jednačine balansa broja čestica je:

$$\begin{aligned}
\frac{dn_i}{dt} = & \sum_j \sum_m k_{jm}^S n_j n_m + \sum_l \sum_p \sum_q k_{lpq}^S n_l n_p n_q - \\
& - n_i \sum_r k_{ir}^L n_r - n_i \sum_s \sum_f k_{isf}^L n_s n_f + \frac{F_i^{fgc}}{V} n_i^{fgc}(t=0) - \frac{F_i}{V} n_i(t) - \\
& - n_i \frac{D_i}{\Lambda_i^2} - \Gamma_i^{wall} \frac{A}{V}.
\end{aligned} \tag{81}$$

U jednačini (81) usvojeni su latinski indeksi za pojedinačne vrste čestica (komponente plazme). k_{jm}^S i k_{lpq}^S predstavljaju koeficijente brzine dvočestičnog procesa $j - m$ i tročestičnog procesa $l - p - q$ u kojem nastaje čestica vrste i , k_{ir}^L i k_{isf}^L predstavljaju koeficijente brzine dvočestičnog procesa $i - r$ i tročestičnog procesa $i - s - f$ u kojem nestaje čestica vrste i (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Peti i šesti član na sednoj strani jednačine (81) opisuju efekte zapreminskog protoka (engl. flow) $F_i = \Delta V_i / \Delta t$ [$\text{m}^3/\text{s} = 60000 \text{slm}$] (engl. standard liter per minute, slm), gde je V karakteristična zapremina sistema, pri čemu za komponente osnovnog gasa (engl. feed gas component, fgc) treba uračunati pozitivan doprinos protoka (dotok u reaktor) na početku simulacije ($t = 0$) (Liu, Bruggeman, Iza, Rong, Kong, 2010). Sedmi član opisuje efekte difuzije, pri čemu su D_i i Λ_i koeficijent i karakteristična dužina difuzije za čestice vrste i (van Gaens, Bogaerts, 2013). Osmi član opisuje efekte flukseva čestica ka zidu, gde je V zapremina plazme a A površina koja je obuhvata. Za slučaj jona najčešće se modeluje u formi $\Gamma_i^{wall} = n_{is} u_B$, pri čemu je u_B Bomova brzina a n_{is} koncentracija čestica vrste i na granici plazma/prelazni sloj na Slici 2 (Hurlbatt et al., 2017).

U globalnim modelima se kao parametar koji je kritičan – srednja energija elektrona mogu koristiti bilo merenja na osnovu sonde ili drugih tehnika, rezultati teorijsko numeričkih radova, odnosno korišćeni parametri u drugim globalnim modelima (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a; Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) a može se energija određivati i na osnovu balansa koji su kompatibilni sa nivoom kompleksnosti globalnih modela (van Gaens, Bogaerts, 2013;

Dorai, Kushner, 2003; Kim, Lieberman, Lichtenberg, Gudmundsson, 2006; Gudmundsson, Thorsteinsson, 2007; Ashida, Lee, Lieberman, 1995). Energija se prevodi na efektivno električno polje E/N , preko koga se mapiraju u tabeli transportni i brzinski koeficijenti na uslove pri zadatoj energiji. Treba naravno biti svestan nedostataka ovakvih pojednostavljenja jer EEDF ima veoma složen oblik i tom prilikom najveće razlike su u repu funkcije raspodele na velikim energijama, koji određuje jonizaciju kao kritičan proces za održavanje plazme, a operativni uslovi plazme se određuju iz balansa proizvodnje naelektrisanih čestica i njihovih gubitaka. Aproximirajući srednju energiju svih elektrona energijom termalnog kretanja na osnovu jednačine (12), $n_e(\varepsilon_e) \cong \frac{3}{2}n_e k_B T'_e$ (gde je T'_e izražena u [K]), uz prelaz na jedinicu [eV] na osnovu $T_e[\text{eV}] = (k_B T'_e)/e$, jednačina (80) dobija oblik (van Gaens, Bogaerts, 2013; Dorai, Kushner, 2003; Alves, Bogaerts, Guerra, Turner, 2018):

$$\frac{d}{dt}(n_e T_e) = \frac{2S_{abs}}{3e} - \sum_i k_{ei}^{el} n_e n_i \frac{2m_e}{M_i} (T_e - T_g^e) - \frac{2}{3} \sum_j k_{ej}^{inel} n_e n_j \varepsilon_{ej}^{thr}, \quad (82)$$

pri čemu je usvojen latinski indeks za različite komponente plazme (e za elektrone). U jednačini (82) T_e predstavlja temperaturu elektrona a T_g^e temperaturu gasa ($\sim 10^2$ eV), uračunatu zbog kretanja čestica gasa po analogiji sa $\langle \varepsilon_\beta \rangle$ u (72) i (80). S_{abs} predstavlja snagu koju plazma dobija od električnog izvora po jedinici zapremine ($[\text{W}/\text{m}^3]$) i najčešće se uzima u formi Džulovih gubitaka $\vec{j} \cdot \vec{E}$ na osnovu (80) (Dorai, Kushner, 2003; van Gaens, Bogaerts, 2013). U slučaju ICP pražnjenja gustina apsorbovane snage se može predstaviti preko efektivne vrednosti struje, odnosno napona i efektivne impedanse kola (Chabert, Lichtenberg, Lieberman, Marakhtanov, 2001; Chabert, Monreal, Bredin, Popelier, Aanesland, 2012). Takođe, jedan od načina za procenu S_{abs} u slučaju AC plazma mlazeva jeste pomoću strujno-naponske karakteristike pražnjenja u formi aktivne snage $P = I_{ef} U_{ef} \cos\varphi$ po jedinici zapremine (Schröter et al., 2018b):

$$S_{abs} = \frac{P_{plasma\ on} - P_{plasma\ off}}{V}. \quad (83)$$

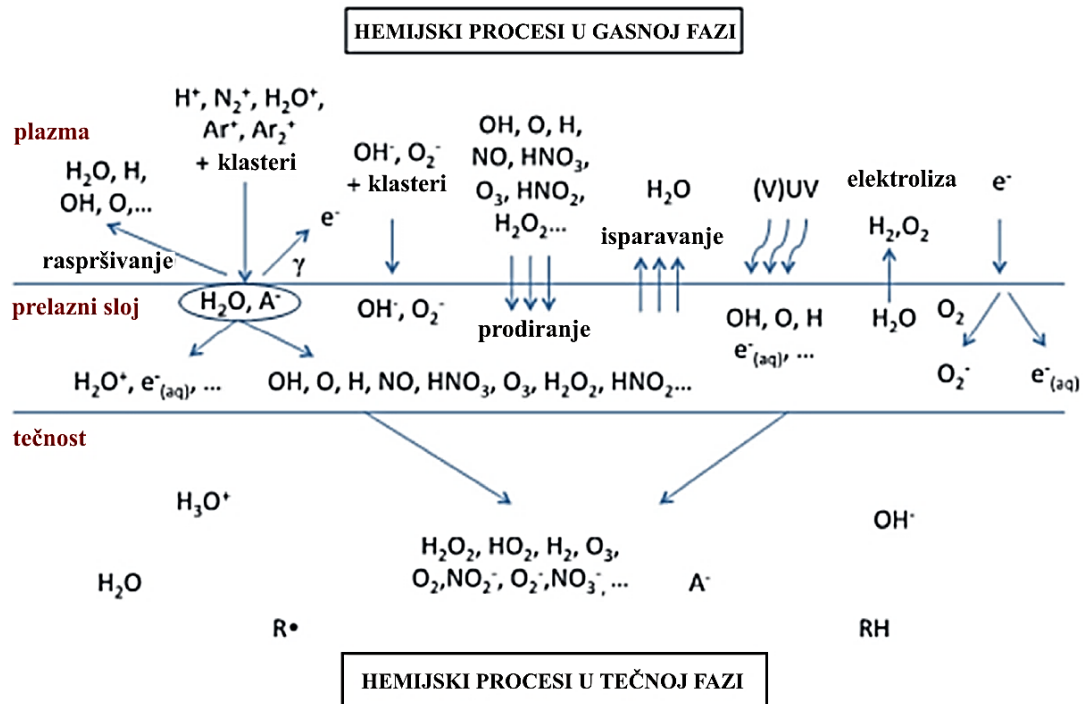
U sumi $\sum_j k_{ej}^{inel} n_e n_j \varepsilon_{ej}^{thr}$ podrazumeva se sumiranje po svim neelastičnim procesima rasejanja elektrona na česticama vrste j (ekscitacije, disocijacije, jonizacije, zahvati). Za superelastične procese prag ε_{ej}^{thr} treba uzeti kao negativan zbog predznaka “-“ u (82).

Analogna procedura za proračun srednje energije može se primeniti i za druge komponente plazme, međutim model se pojednostavljuje uz pretpostavku da za jone i neutrane važi MB raspodela na konstantnoj temperaturi gasa. Na osnovu toga, sistem (81)-(82) predstavlja osnovni sistem jednačina 0D globalnog modela, za čije rešavanje je neophodno raspolagati transportnim koeficijentima, dobijenih ili pomoću merenja (Petrović et al., 2009) ili rešavanjem BE i tabeliranjem podataka (Liu, Bruggeman, Iza, Rong, Kong, 2010; Rauf, Kushner, 1999; Nakano, Shimura, Petrović, Makabe, 1994).

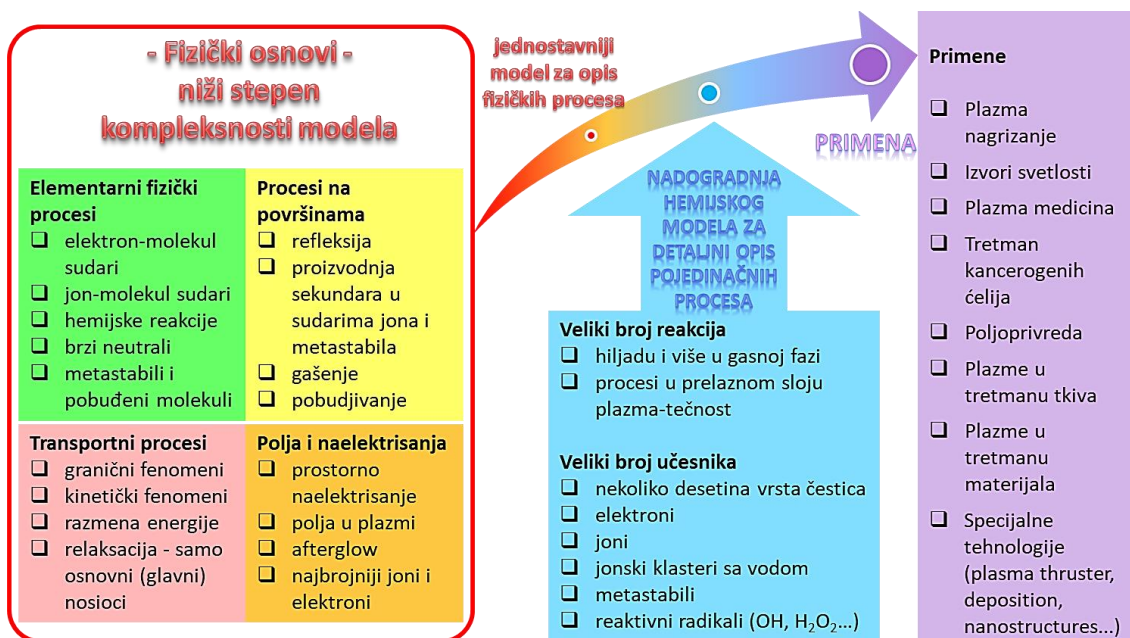
4.3.2 Potrebe za globalnim modelima u modelovanju niskotemperaturne plazme

Specifičnu osobinu AP LTP predstavlja veoma složen hemijski sastav (više desetina vrsta čestica) i veliki broj fizičkih i hemijskih procesa (hiljadu i više) koji se razvijaju u vremenskim intervalima reda nanosekundi od početka pražnjenja, Slika 16. Sa druge strane, neki procesi kao što su protok ili difuzija imaju vremenske konstante od više desetina milisekundi, što zahteva veliku dinamiku do deset redova veličine pri rešavanju sistema jednačina (81)-(82). U cilju optimizacije postojećih primena i otvaranja mogućnosti za nove, neophodno je razumevanje procesa i fenomena koji se javljaju u ovim tipovima plazmi do nivoa detaljnog hemijskog modela. Zbog navedenih karakteristika AP LTP je teško proučavati primenom kinetičkih (MC, PIC-MCC) i fluidnih modela jer mogu da prate mali broj reakcija, najčešće za jone kako bi se proračunao balans naelektrisanja i rezultujućih polja. Kompleksni hemijski sastav i mnoštvo procesa mogu se efikasnije opisati pomoću globalnog modela, Slika 17. Kao osnovne prednosti globalnih modela u odnosu na PIC-MCC i fluidne mogu se navesti:

- a) mogućnost za uključivanje velikog broja čestica i hemijskih reakcija u proračun;
- b) značajno brži proračun sastava plazme;
- c) proračun u okviru vremenskih intervala daleko većih od karakterističnih vremena hemijskih procesa;
- d) veliki dinamički opseg, odnosno mogućnost za istovremeno praćenje pojedinih čestica u plazmi čije se koncentracije razlikuju za više redova veličine, uključujući i one čija se aktivnost ne bi mogla detektovati pomoću merenja;
- e) mogućnost za određivanje dominantnih kanala za nastanak i gašenje za svaku komponentu plazme.



Slika 16. Šema najvažnijih procesa i čestica za slučaj kontakta plazme u smeši Ar/vlažni vazduh sa vodom (preuzeto iz: Bruggeman et al., 2016, prevedeno na srpski).



Slika 17. Pregled fizičkih i hemijskih procesa u LTP na atmosferskom pritisku sa odgovarajućim nivoima kompleksnosti modela za opis i analizu.

5. UTICAJ BAZE PRESEKA NA EEDF I KOEFICIJENTE BRZINE

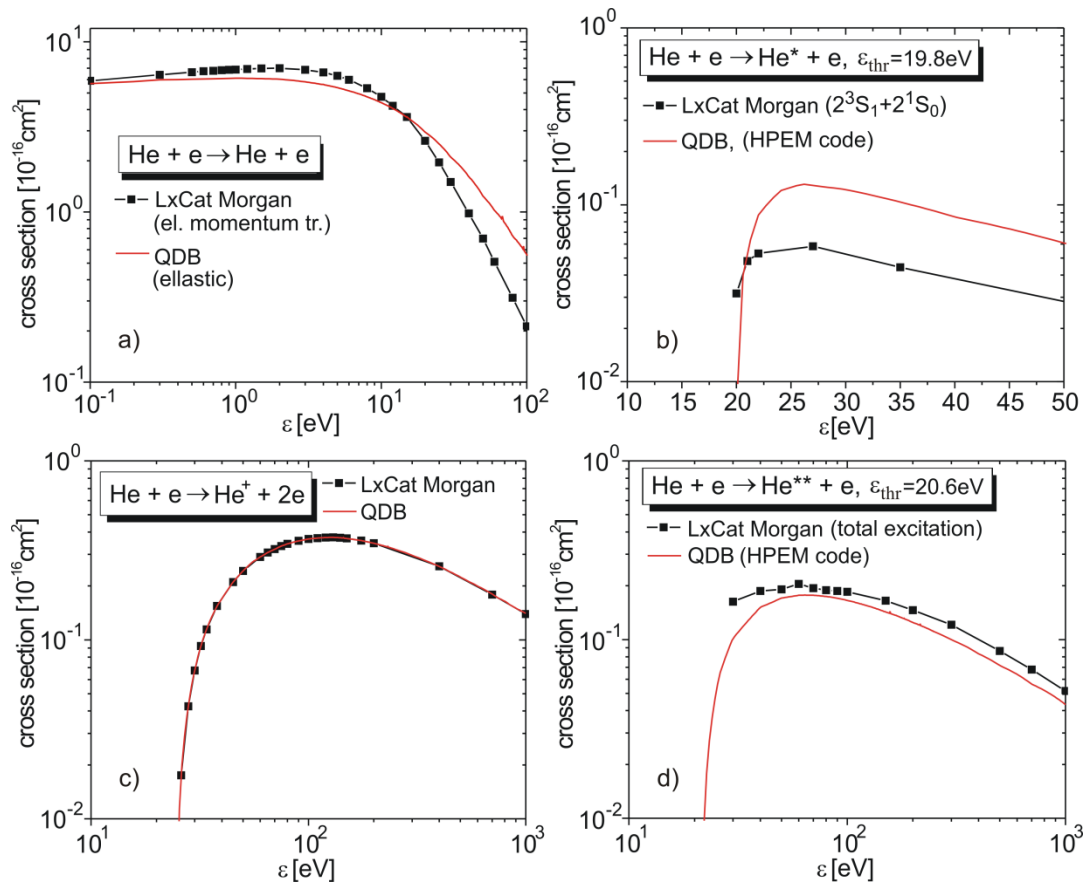
Set preseka koji se koristi za modelovanje plazmi mora biti konzistentan i kompletan, što znači da pruža adekvatan opis svih elektronskih sudarnih procesa u kojima dolazi do prenosa impulsa, gubitaka energije, promene broja elektrona i u konačnom, mogućnost za reprodukciju merenih vrednosti transportnih koeficijenata u eksperimentima na bazi rojeva elektrona (Alves et al., 2013; Petrović et al., 2009). Tehnika rojeva za dobijanje ovakvog seta preseka predstavlja iterativnu proceduru u kojoj se vrednosti pojedinačnih preseka modifikuju na osnovu poređenja izračunatih vrednosti transportnih koeficijenata sa merenim (u okviru eksperimentalne greške ili teorijske nesigurnosti). Kompletan set preseka mora sadržati:

- a) presek za elastični/efektivni prenos impulsa,
- b) preseke za ekscitaciju u rotaciono, vibraciono i elektronski pobuđena stanja od značaja za konkretan molekularni gas,
- c) presek za totalnu jonizaciju,
- d) preseke za procese zahvata elektrona u slučaju elektronegativnog gasa.

U ovom odeljku je prezentovano poređenje setova preseka za rasejanje elektrona na atomu helijuma i molekulu H₂O u osnovnom stanju, dostupnih u bazi LXCat Morgan (Morgan database, www.lxcat.net) i bazi Quantemol-DB (Tennyson et al., 2017). Ovi setovi preseka su iskorišćeni kao ulazni parametri za numeričko rešavanje Boltzmanove jednačine primenom programa BOLSIG+, u cilju određivanja transportnih koeficijenata, funkcije raspodele elektrona po energiji i koeficijenata brzine za procese rasejanja elektrona (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019). Izvršeno je poređenje izračunatih koeficijenata u cilju ispitivanja kvaliteta i potpunosti seta preseka dostupnih u bazi Quantemol-DB (QDB) za potrebe modelovanja niskotemperaturnih plazmi i interpretacije eksperimentalnih rezultata.

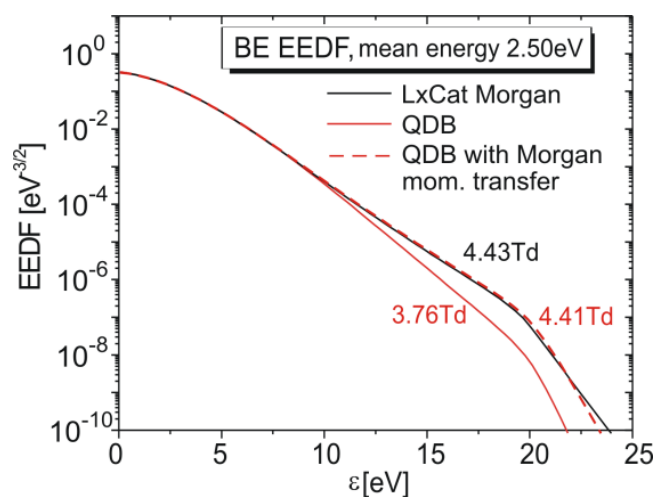
5.1 Primer za He

Na Slici 18a-d) prikazano je poređenje preseka za rasejanje elektrona na atomu helijuma u osnovnom stanju, dostupnih u bazama Morgan LXCat i QDB. Podaci iz Morgan baze predstavljaju kompletan set preseka dobijen na osnovu eksperimenata sa rojevima elektrona, testiran pomoću programa ELENDIF (Morgan, Penetrante, 1990). Grupisani su kao preseci za elastični prenos impulsa, ekscitaciju u stanje $2^3S_1+2^1S_0$ sa pragom 19,8eV, totalnu ekscitaciju (sumarno za sva stanja sa pragom iznad 20,6eV) i jonizaciju. Podaci trenutno dostupni u bazi QDB navedeni su kao presek za elastično rasejanje, ekscitaciju u He^* , ekscitaciju u He^{**} i jonizaciju. Na osnovu sličnosti u vrednosti, obliku i pragu, pretpostavlja se da se preseci poređeni na Slikama 18b) i d) odnose na iste procese rasejanja.



Slika 18. Preseci za rasejanje elektrona na atomu helijuma, elastični prenos impulsa i elastično rasejanje a), ekscitaciju b), jonizaciju c) i totalnu ekscitaciju d) (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

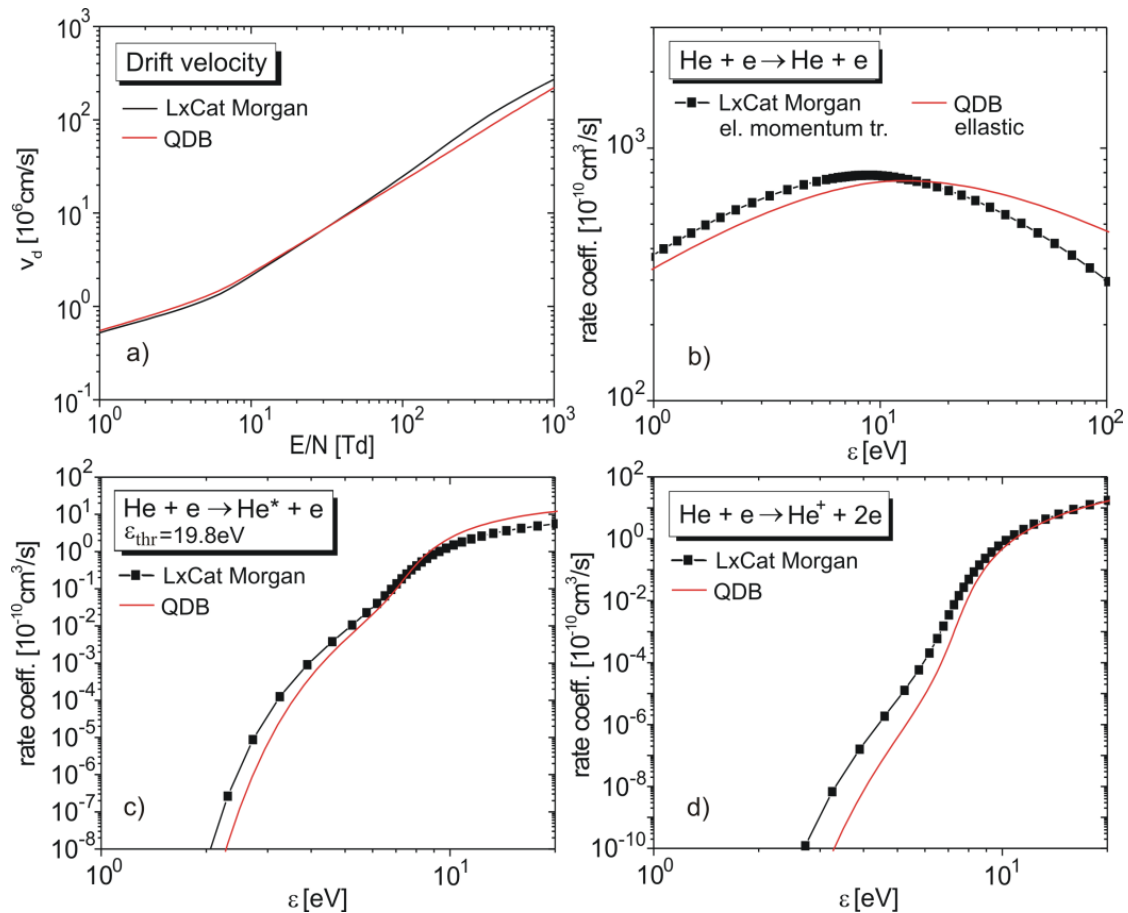
Na Slici 19. prikazano je poređenje EEDF, dobijenih rešavanjem BE pomoću programa BOLSIG+ na osnovu preseka iz baza Morgan i QDB, za istu srednju energiju elektrona 2,50eV. Korišćenjem preseka iz baze QDB ta srednja energija elektrona dobija se za nižu vrednost redukovanog električnog polja $E/N = 3,76\text{Td}$ u odnosu na $4,43\text{Td}$ sa presecima iz Morgan baze, pri čemu EEDF ima niži rep za red veličine i više, iznad energije 15eV dok se prva razlika pojavljuje iznad 10eV. Navedene razlike prevashodno potiču od razlike između Morgan preseka za elastični prenos impulsa i QDB preseka za elastično rasejanje (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019). Iz (32) i (34) sledi da korišćenje QDB preseka za elastično rasejanje kao preseka za prenos impulsa dovodi do razlike u vrednosti E/N i EEDF zbog težinskog faktora $(1 - \cos\theta)$, na osnovu razlike preseka na Slici 18a). Kako se preseci za elastični prenos impulsa u tehnici rojeva najčešće dobijaju na osnovu merenih vrednosti brzine drifta (Petrović et al., 2009), oni uračunavaju efekte anizotropije u rasejanju. Zamenom QDB preseka Morgan presekom za elastični prenos impulsa dobija se bolje slaganje između funkcija raspodele i ista srednja energija za bližu vrednost redukovanog polja $E/N = 4,41\text{Td}$ (Slika 19), pri čemu su male razlike iznad 20eV posledica razlike u presecima za ekscitaciju (Slika 18b i d).



Slika 19. BE EEDF izračunata na osnovu preseka iz baze Morgan i QDB (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

Na Slici 20. prikazano je poređenje brzine drifta i koeficijenata brzine izračunatih na osnovu Morgan i QDB setova preseka. Najuočljivije razlike postoje kod koeficijenata brzine za procese sa visokim pragom, ekscitaciju i jonizaciju, kao

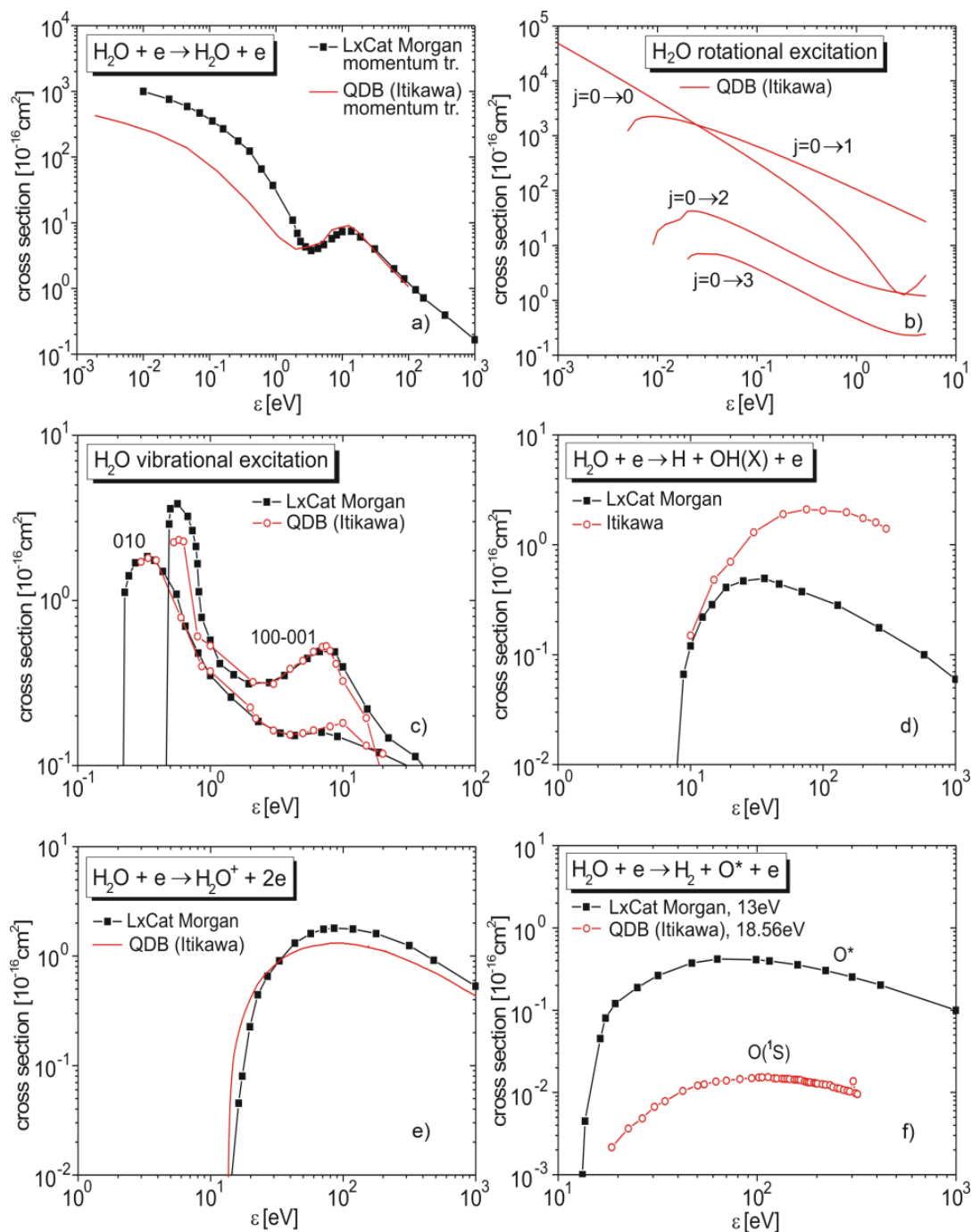
posledica razlike u repu funkcija raspodele, odnosno neadekvatnog korišćenja QDB preseka za elastično rasejanje, ukazujući na to da kompletnost baze preseka predstavlja karakteristiku seta preseka kao celine. Izražen uticaj preseka za elastično rasejanje i preseka za elastični prenos impulsa na EEDF je posledica toga što ti preseki imaju značajno veću vrednost u odnosu na preseke neelastičnih procesa, odnosno činjenice da je koliziorna frekvencija elastičnih sudara najveća. To se odražava na sve koeficijente brzine i transportne koeficijente koji se određuju na osnovu EEDF. Može se primetiti da je razlika veća kod koeficijenta za jonizaciju zbog većeg praga i to je direktna posledica razlike u EEDF obzirom da Morgan i QDB presek za jonizaciju imaju veoma bliske vrednosti u celom energijskom intervalu (Slika 18d). U slučaju ekscitacije razlika je manja zbog nižeg praga ali i veće vrednosti QDB preseka za ekscitaciju u odnosu na odgovarajući presek iz Morgan baze (Slika 18b).



Slika 20. Brzina drifta a) i koeficijenti brzine za: prenos impulsa i elastično rasejanje b), ekscitaciju c) i jonizaciju helijuma d), na osnovu preseka iz baze Morgan LxCat (crne linije sa simbolima) i baze QDB (crvene linije) (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

5.2 Primer za H₂O

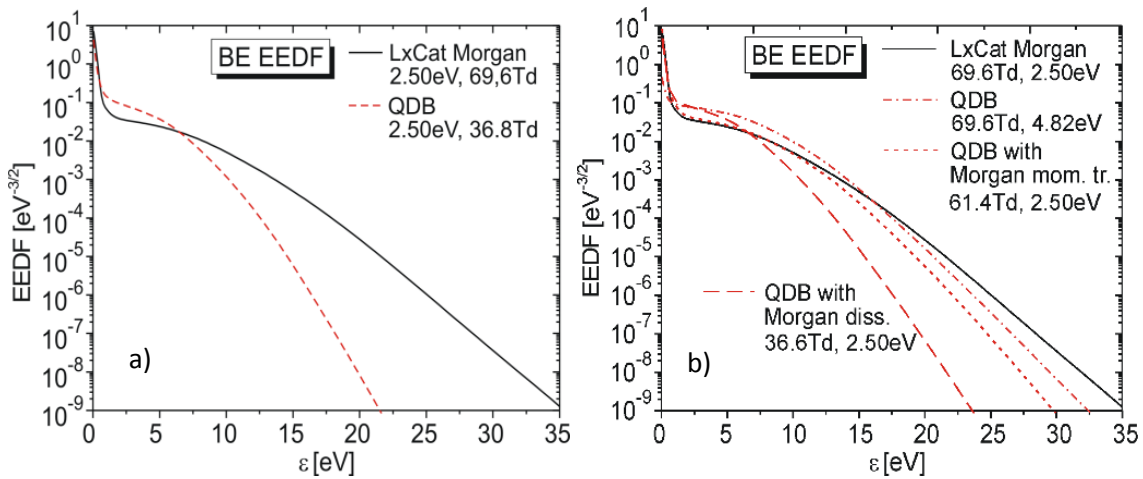
Poređenje preseka za rasejanje elektrona na molekulu H₂O u osnovnom stanju iz baza Morgan LXCat i QDB prikazano je na Slikama 21a-f). Preseci u bazi QDB predstavljaju preseke koje je razvio Itikawa (Itikawa et al., 2005).



Slika 21. Poređenje preseka za rasejanje elektrona na molekulu H₂O iz baza Morgan LXCat i QDB (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

Kao što je prikazano na Slici 21a), postoji značajna razlika između preseka za elastični prenos impulsa iz baza Morgan i Itikawa na energijama nižim od 1eV, koja bi mogla biti posledica preseka za rotaciono elastično rasejanje ($j=0-0$), prikazanog na Slici 21b). Ovaj presek ima značajan doprinos u preseku za elastično rasejanje (Itikawa et al., 2005), što se može odraziti na presek za prenos impulsa nakon integracije sa težinskim faktorom $(1 - \cos\theta)$. Preseci za rotacione ekscitacije ($j=0-0,1,2,3$) iz baze Itikawa su proračunati metodom R-matrice (Faure, Gorfinkiel, Tennyson, 2004), dok set preseka u bazi Morgan ne sadrži preseke za rotacione prelaze molekula H_2O (Pancheshnyi et al., 2012; Morgan database, www.lxcat.net). Preseci za vibracionu ekscitaciju molekula H_2O u stanja $(100)-(001)$ i (010) na Slici 21c) se dobro slažu iako postoji mala razlika u vrednosti praga (0,5eV i 0,2eV u bazi Morgan i 0,453eV i 0,3eV u bazi Itikawa). Daleko izraženija razlika postoji kod preseka za disocijaciju molekula H_2O sa pragom 7,6eV (Slika 21d), koja predstavlja važan proces nastanka OH radikala od izuzetnog značaja za primene LTP u biomedicini. Na Slici 21e) može se primetiti da postoji dobro slaganje između Morgan LXCat i Itikawa QDB preseka za jonizaciju. Konačno, Slika 21f) prikazuje preseke za disocijaciju molekula H_2O pri kojoj nastaju pobuđeni atomi kiseonika. U bazi Morgan ovaj proces ima prag 13eV ali bez preciziranja elektronskog stanja O^* , dok se u bazi QDB odgovarajući presek odnosi na proizvodnju metastabilnog stanja $O(^1S)$ sa pragom 18,56eV (Itikawa et al., 2005). Obzirom na niži prag i veću vrednost za skoro dva reda veličine, presek u bazi Morgan bi mogao da predstavlja sumarni presek za disocijaciju u različita pobuđena stanja atoma O, što bi doprinelo kompletnosti baze. U literaturi se mogu naći podaci o presecima za rasejanje elektrona na molekulu H_2O dobijeni na osnovu tehnike rojeva (White et al., 2014; de Urguijo et al., 2014; White et al., 2018; Yousfi, Benabdessadok, 1996; Kawaguchi, Takahashi, Satoh, Itoh, 2016), međutim oni se odnose na oblast nižih energija. Sa druge strane, setovi preseka dobijeni na osnovu tehnike mlazeva mogu sadržati podatke drugačijeg kvaliteta i neki preseci mogu nedostajati bez odgovarajuće kompenzacije kroz druge uključene procese. Poređenje EEDF, brzine drifta i koeficijenata brzine, dobijenih na osnovu preseka iz baza Morgan LXCat i Itikawa QDB, prikazano na Slikama 22a,b) i 23a-d), izvršeno je u cilju prikaza različitih dostupnih baza podataka i njihovog uticaja na transportne i brzinske koeficijente neophodne za modelovanje LTP (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

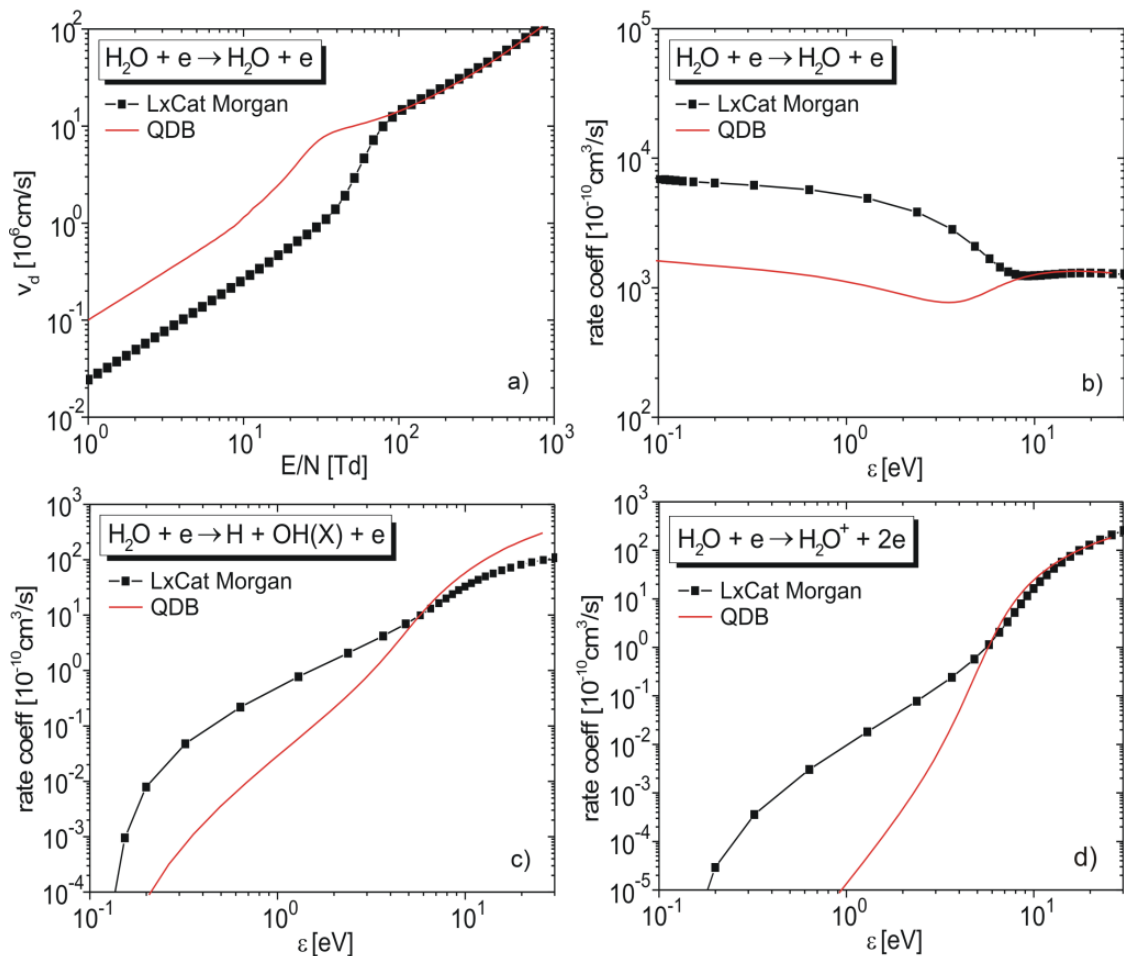
Sa presecima iz baze QDB istoj srednjoj energiji od 2,50eV odgovara oko dva puta manja vrednost redukovanog električnog polja $E/N = 36,8\text{Td}$ i postoji velika razlika između vrednosti raspodela za energije iznad praga za disocijaciju 7,6eV, kao što je prikazano na Slici 22a) (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019). U oba slučaja na energijama koje odgovaraju pragovima vibracionih ekscitacija raspodele imaju karakteristične strukture u formi platoa koje mogu biti posledica superelastičnih sudara. Proračun je vršen za slučaj neperturbovanog gasa H_2O , samo sa termalnom populacijom vibraciono pobuđenih stanja. U slučaju veće naseljenosti ovih stanja efekat superelastičnih sudara na EEDF bi morao biti korektnije uračunat proračunom za smešu $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}^*(\text{vib})$, po analogiji sa rezultatima iz literature za druge smeše (Colonna, Capitelli, 2001; Guerra, Sa, Loureiro, 2004).



Slika 22. EEDF izračunata na osnovu preseka za H_2O iz baza Morgan LXCat i Itikawa QDB a), uticaj električnog polja (crta-tačka-crta), preseka za prenos impulsa (tačkasta) i preseka za disocijaciju (isprekidana linija) b) (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

Na Slici 22b) prikazan je uticaj redukovanog električnog polja, preseka za prenos impulsa i preseka za disocijaciju na EEDF (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019). Za vrednost redukovanog polja $E/N = 69,6\text{Td}$ na osnovu preseka iz baze Itikawa QDB dobija se skoro duplo veća srednja energija 4,82eV, pri čemu su razlike u visokoenergijskom repu raspodela daleko manje a plato raspodele na nižim energijama je i dalje iznad platoa raspodele dobijene na osnovu preseka iz baze Morgan LXCat. Ovi efekti su posledica prevashodno razlika u presecima za prenos impulsa (Slika 21a). Ukoliko se iskoristi presek za prenos impulsa iz baze Morgan, a svi ostali preseki

iskoriste iz baze Itikawa, ista srednja energija od 2,50eV dobija se za bližu vrednost redukovanog polja $E/N = 61,4\text{Td}$, nestaju razlike u vrednostima platoa na nižim energijama, dok preostale razlike u repovima raspodela iznad 7,60eV potiču od razlika u presecima neelastičnih procesa (tačkasta crvena linija). Uticaj preseka za disocijaciju, koji u bazi Morgan ima niže vrednosti nego u bazi Itikawa iznad 10eV, ogleda se u malo nižoj vrednosti redukovanog polja $E/N = 36,6\text{Td}$ na kojem se dobija ista srednja energija 2,50eV.



Slika 23. Brzina drifta a) i koeficijenti brzine za elastični prenos impulsa b), disocijaciju c) i jonizaciju molekula H_2O d), dobijeni na osnovu preseka iz baze Morgan (crna linija sa simbolima) i baze Itikawa (crvena linija) (Mladenović, Gocić, Petrović, 2019).

Na Slici 23a-d) prikazano je poređenje brzina drifta, koeficijenata brzine za elastični prenos impulsa, disocijaciju i jonizaciju molekula H_2O , izračunatih na osnovu preseka iz baze Morgan LXCat (crna linija sa simbolima) i Itikawa QDB (crvena linija)

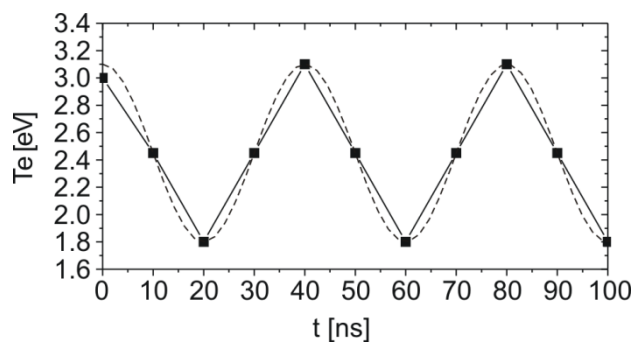
(Mladenović, Gocić, Petrović, 2019). Većoj vrednosti preseka za elastični prenos impulsa (Slika 21a) odgovara manja vrednost brzine drifta obzirom da elastični sudari haotizuju kretanje elektrona, kao i veća vrednost odgovarajućeg koeficijenta brzine obzirom da je elastično rasejanje dominantno na nižim energijama gde su razlike u funkcijama raspodele male (Slika 22a). U slučaju neelastičnih procesa treba imati u vidu razlike između preseka ali i razlike između funkcija raspodele. Presek za disocijaciju u bazi Morgan ima niže vrednosti u odnosu na presek iz baze Itikawa (Slika 21d), međutim EEDF, izračunata na osnovu preseka iz Morgan baze, iznad 7,60eV ima daleko veće vrednosti (Slika 22a), što rezultira većim vrednostima koeficijenta brzine (Slika 23c). Na većim energijama presek iz baze Morgan počinje da opada i odgovarajući koeficijent brzine postaje niži u odnosu na koeficijent izračunat na osnovu preseka iz baze QDB Itikawa. Konačno, obzirom da preseki za jonizaciju molekula H₂O imaju bliske vrednosti (Slika 21e), niža vrednost koeficijenta brzine, izračunatog na osnovu preseka iz baze Itikawa predstavlja direktnu posledicu niže vrednosti EEDF iznad praga za jonizaciju 12,6eV (Slika 22a).

6. GLOBALNI MODEL ZA SLUČAJ He/O₂ RADIOFREKVENTNE PLAZME U KONTAKTU SA VLAŽNIM VAZDUHOM

6.1 Model sa zadatom temperaturom i koncentracijom elektrona

U ovom Odeljku biće dat pregled rezultata 0D globalnog modela sa zadatom temperaturom i koncentracijom elektrona, publikovanih u (Mladenovic, Gocic, Maric, Petrovic, 2018). U radu je analiziran uticaj koncentracije elektrona kao parametra na EEDF i na hemijski sastav plazme nakon 5ms od početka pražnjenja, za slučaj RF mikro-plazma mlaza u smeši He + 0,5% O₂, sa 250ppm vlažnog vazduha (78% N₂, 21% O₂, 10⁻²% CO₂, 10⁻³% N₂O, 10⁻⁵% NO₂, 10⁻⁶% NO) relativne vlažnosti 1%. Kosinusni model (84) za promenu temperature elektrona u vremenu sa frekvencijom $\nu = 12,5\text{MHz}$ (Slika 24) dobijen je analitičkim fitovanjem korišćenih podataka u globalnom modelu iz rada (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a), koji su pak dobijeni na osnovu teorijsko numeričkih rezultata fluidnog modela iz rada (Niemi et al., 2011):

$$T_e(t) = 0,65\cos[2(2\pi\nu)t] + 2,45 \text{ [eV]}. \quad (84)$$



Slika 24. Analitički fit za temperaturu elektrona (isprekidana linija) na osnovu podataka iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a, crna linija sa kvadratićima).

Balansne jednačine broja čestica u modelu imaju oblik:

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} = & \sum_j \sum_m k_{jm}^{(C)} n_j n_m + \sum_l \sum_p \sum_q k_{lpq}^{(C)} n_l n_p n_q - \\ & - n_i \sum_r k_{ir}^{(D)} n_r - n_i \sum_s \sum_f k_{isf}^{(D)} n_s n_f, \end{aligned} \quad (85)$$

gde $t, n_i, n_j \dots n_f$ predstavljaju vreme i koncentraciju i -te, j -te ... i f -te vrste, $k_{jm}^{(C)}$ i $k_{ir}^{(D)}$ predstavljaju koeficijente brzine dvočestičnog procesa između j -te i m -te vrste, odnosno i -te i r -te vrste, a $k_{lpq}^{(C)}$ i $k_{isf}^{(D)}$ koeficijente brzine tročestičnog procesa između l -te, p -te i q -te vrste, odnosno i -te, s -te i f -te vrste, respektivno. Indeksi „(C)” i „(D)” označavaju procese nastanka (engl. creation) i nestanka (engl. destruction) čestice i -te vrste. Sistem jednačina (85) sadrži 59 spregnutih nelinearnih diferencijalnih jednačina za proračun koncentracija tokom vremena, za svaku od 59 komponenata plazme prikazanih u Tabeli 1. Model uključuje ukupno 1048 procesa, preuzetih iz rada (Murakami, Niemi, Gans, O’Connell, Graham, 2013a).

Tabela 1. Komponente plazme uključene u globalni model iz rada (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

Početni sastav	He + 0,5% O ₂ + 250ppm vazduha (78% N ₂ , 21% O ₂ , 10 ⁻² % CO ₂ , 10 ⁻³ % N ₂ O, 10 ⁻⁵ % NO ₂ , 10 ⁻⁶ % NO), relativne vlažnosti 1%.
Reaktivni neutrali	He*, He ₂ *, O, O(¹ D), O(¹ S), O ₂ (v=1), O ₂ (v=2), O ₂ (v=3), O ₂ (v=4), O ₂ (¹ Δ), O ₂ (¹ Σ), O ₃ , CO ₃ , CO ₄ , N, N(² D), N(² P), N ₂ (v=1), N ₂ (v=2), N ₂ (v=3), N ₂ (v=4), NO ₃ , H, OH
Joni	Pozitivni joni He ⁺ , He ₂ ⁺ , O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ₄ ⁺ , N ⁺ , N ₂ ⁺ , N ₄ ⁺ , NO ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₃ O ⁺
	Klasteri pozitivnih jona O ₂ ⁺ · H ₂ O, H ₃ O ⁺ · H ₂ O, H ₃ O ⁺ · OH
	Negativni joni O ⁻ , O ₂ ⁻ , O ₃ ⁻ , O ₄ ⁻ , NO ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻ , CO ₄ ⁻
	Klasteri negativnih jona O ₂ ⁻ · H ₂ O, NO ₂ ⁻ · H ₂ O, NO ₃ ⁻ · H ₂ O, CO ₃ ⁻ · H ₂ O, CO ₄ ⁻ · H ₂ O

Kada su u pitanju elektronski sudarni procesi postoje dva tipa koeficijenata brzine koji se mogu koristiti u globalnim modelima (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018), zavisno od odabira EEDF u jednačini (22). Prvu grupu čine koeficijenti koji se dobijaju na osnovu MB EEDF (2) i koji se izražavaju kao funkcija elektronske temperature u karakterističnom Arenijusovom obliku (T_e u [eV]):

$$k(T_e)|_{MB} = AT_e^B \exp\left(-\frac{C}{T_e}\right), \quad (86)$$

gde se numerički parametri A , B i C mogu odrediti iz jednačine (22) na osnovu poznatog seta preseka ili se mogu odrediti iz eksperimentalnih podataka za koeficijente brzine ukoliko podaci postoje. U drugu grupu spadaju koeficijenti koji se proračunavaju na osnovu neravnotežne EEDF, dobijene numeričkim rešavanjem Boltzmanove jednačine i koji se mapiraju u formi tabela u funkciji E/N ili srednje energije elektrona T_e . Tabela 2. sadrži odabrane elektronske sudarne procese iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a), za koje su u radu (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) koeficijenti brzine izračunati primenom programa BOLSIG+ na osnovu jednačine (65) korišćenjem LXCat baza preseka Morgan (He, O₂, O₂(¹Δ), O₂(¹Σ), O, N) i Itikawa (N₂, H₂O). Poređenje hemijskog sastava plazme na osnovu globalnog modela sa MB i BE koeficijentima je prezentovano u radu (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). U cilju samousaglašenog proračuna EEDF i koeficijenata brzine sa proračunom koncentracija komponenata plazme tokom vremena, molski udeli x_k na koje su normirani odgovarajući setovi preseka u (47) određeni su iterativnim postupkom na osnovu vrednosti koncentracija proračunatih nakon 1ms: He 0,994, O₂ 0,005, N₂ 195ppm, H₂O 2,5ppm, O₂(¹Δ) 500ppm, O₂(¹Σ) 10ppm, O 980ppm, N 1ppm. Sistem jednačina (85) rešavan je u programu MATLAB primenom potprograma “ode15s” za rešavanje “stiff” sistema diferencijalnih jednačina, sa relativnom i apsolutnom tolerancijom 10^{-12} i 10^{-6} i sa vremenskim korakom 10ns.

Tabela 2. Elektronski sudarni procesi za koje su koeficijenti brzine računati pomoću programa BOLSIG+ u radu (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Prikazani MB koeficijenti brzine preuzeti iz (Murakami, Niemi, Gans, O’Connell, Graham, 2013a).

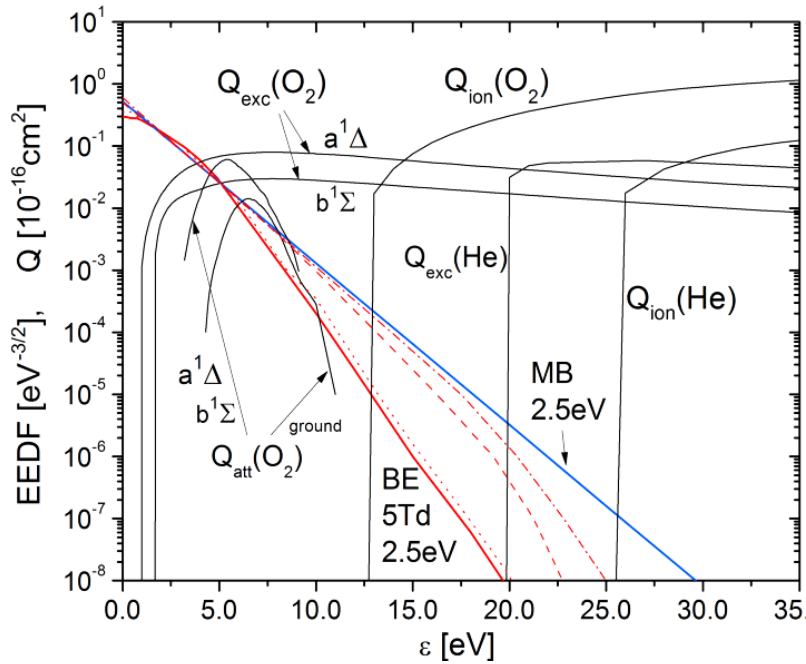
<i>R.N.</i>	<i>elektronski proces</i>	<i>MB koeficijent brzine</i>	<i>BE koeficijent brzine</i>
R1	$\text{He} + e^- \rightarrow \text{He}^* + e^-$	$4,2 \cdot 10^{-9} T_e^{0,31} \exp(-19,8/T_e)$	$f(T_e)$
R2	$\text{He} + e^- \rightarrow \text{He}^+ + 2e^-$	$1,5 \cdot 10^{-9} T_e^{0,68} \exp(-24,6/T_e)$	$f(T_e)$
R3	$\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}_2^+ + 2e^-$	$9,0 \cdot 10^{-10} T_e^{2,0} \exp(-12,6/T_e)$	$f(T_e)$
R4	$\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}_2(^1\Delta) + e^-$	$1,37 \cdot 10^{-9} \exp(-2,14/T_e)$	$f(T_e)$
R5	$\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O}_2(^1\Sigma) + e^-$	$3,24 \cdot 10^{-10} \exp(-2,218/T_e)$	$f(T_e)$
R6	$\text{N}_2 + e^- \rightarrow \text{N} + \text{N} + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-8} T_e^{0,5} \exp(-16,0/T_e)$	$f(T_e)$
R7	$\text{N}_2 + e^- \rightarrow \text{N}_2^+ + 2e^-$	$1,1 \cdot 10^{-8} T_e^{0,5} \exp(-17,2/T_e)$	$f(T_e)$
R8	$\text{H}_2\text{O} + e^- \rightarrow \text{H} + \text{OH} + e^-$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$f(T_e)$
R9	$\text{O}_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow \text{O}_2^+ + 2e^-$	$2,34 \cdot 10^{-9} T_e^{1,03} \exp(-10,663/T_e)$	$f(T_e)$
R10	$\text{O}_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow \text{O}_2^+ + 2e^-$	$2,34 \cdot 10^{-9} T_e^{1,03} \exp(-11,31/T_e)$	$f(T_e)$
R11	$\text{O} + e^- \rightarrow \text{O}^+ + 2e^-$	$9,0 \cdot 10^{-9} T_e^{0,7} \exp(-13,6/T_e)$	$f(T_e)$
R12	$\text{N} + e^- \rightarrow \text{N}^+ + 2e^-$	$1,0 \cdot 10^{-8} T_e^{0,5} \exp(-14,5/T_e)$	$f(T_e)$
R13	$\text{O}_2 + e^- \rightarrow \text{O} + \text{O}^-$	$1,07 \cdot 10^{-9} T_e^{-1,39} \exp(-6,26/T_e)$	$f(T_e)$
R14	$\text{O}_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow \text{O} + \text{O}^-$	$4,19 \cdot 10^{-9} T_e^{-1,376} \exp(-4,54/T_e)$	$f(T_e)$
R15	$\text{O}_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow \text{O} + \text{O}^-$	$4,19 \cdot 10^{-9} T_e^{-1,376} \exp(-5,19/T_e)$	$f(T_e)$
R16	$\text{O}_2 + e^- + \text{M} \rightarrow \text{O}_2^- + \text{M}$	$3,6 \cdot 10^{-31} T_e^{-0,5}$ for M=He, O ₂ $1,24 \cdot 10^{-31} T_0^{-0,5}$ for M=N ₂ $3,9 \cdot 10^{-35}$ for M= O ₂ (¹ Δ) $1,0 \cdot 10^{-31}$ for M=O $1,4 \cdot 10^{-29}$ for M=H ₂ O	$f(T_e)$

Napomena: Koeficijent brzine dvočestičnog procesa [cm^3/s], koeficijent brzine tročestičnog procesa [cm^6/s], T_e [eV], $T_0 = T_g[\text{K}]/300\text{K}$, $f(T_e)$ koeficijent brzine izračunat u programu BOLSIG+ kao funkcija temperature (srednje energije) elektrona na osnovu Morgan LXCat baze preseka.

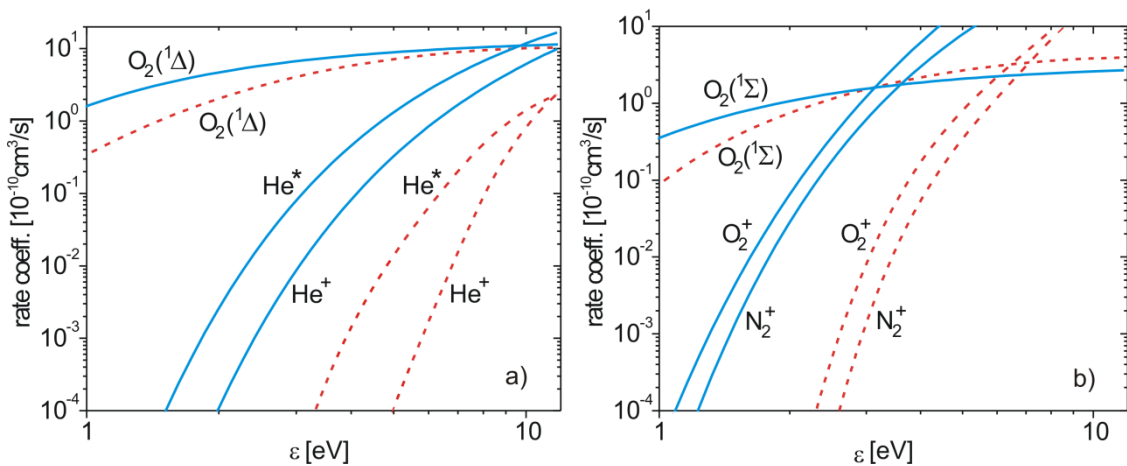
6.1.1 Uticaj EEDF na sastav plazme

Na Slici 25. prikazane su neravnotežne raspodele elektrona po energiji dobijene rešavanjem Bolcmanove jednačine (BE) pomoću programa BOLSIG+ za istu srednju energiju 2,50eV i različite koncentracije elektrona (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Takođe, radi poređenja prikazana je Maksvel-Bolcmanova (MB) raspodela u jedinici $[eV^{-3/2}]$ za istu srednju energiju, kao i preseki za jonizaciju i ekscitaciju He i O₂ iz baze Morgan (Morgan database, www.lxcat.net). Može se zaključiti da u slučaju koncentracije elektrona karakteristične za LTP ($n_e \sim 10^{11} \text{cm}^{-3}$) postoji bitna razlika između BE i MB EEDF u oblasti energija koje odgovaraju pragovima neelastičnih procesa. Uključivanje neelastičnih procesa ima za posledicu značajno smanjenje broja elektrona sa visokim energijama u odnosu na broj koji predviđa MB raspodela, što dovodi do velike razlike između BE i MB koeficijenata za procese sa visokim pragom (Slika 26a,b). Kod procesa sa niskim pragom, kao na primer ekscitacija molekula kiseonika u metastabilna stanja O₂(a¹Δ) i O₂(b¹Σ), disocijativni zahvat ili tročestični zahvat, razlika u koeficijentima brzine je manja kao što je prikazano na Slici 26a,b) i Slici 27a,b). Sa porastom koncentracije elektrona povećava se koliziorna frekvencija e – e sudara i dolazi do izražaja efekat maksvelijanizacije, međutim čak i u slučaju koncentracije elektrona 10¹⁹cm⁻³ koja je uporediva sa koncentracijom osnovnog gasa na 1atm (He~2,45 · 10¹⁹cm⁻³) BE EEDF odstupa od MB iznad praga za ekscitaciju helijuma (Slika 25. crta-tačka-crta), sa još izraženijom razlikom kod praga za jonizaciju (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

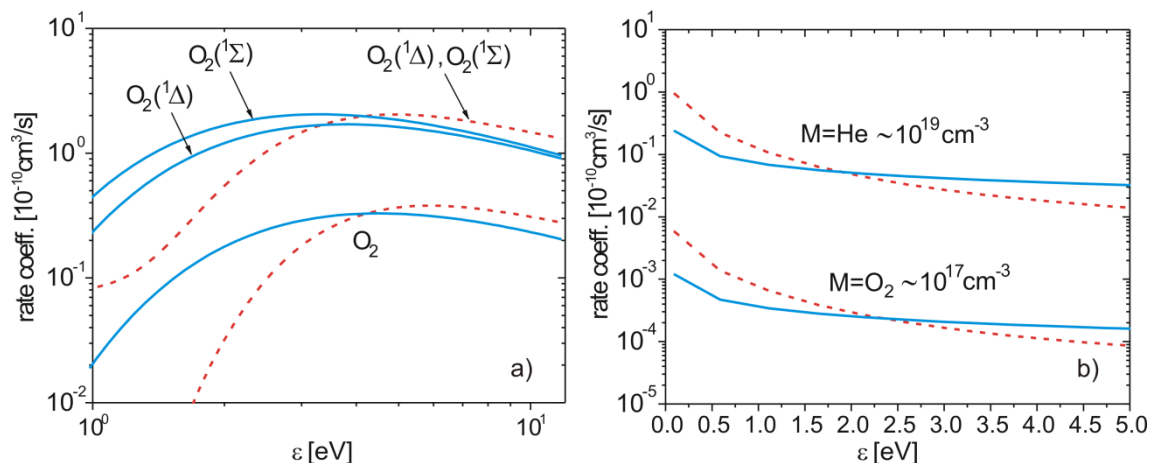
Obzirom da je oblik BE EEDF određen elektronskim sudarnim procesima, ona čak i na nivou aproksimacije dva člana predstavlja daleko bolji izbor za opis elektronskog sistema u odnosu na MB. Čini se da je najbolje da se u globalnim modelima elektroni tretiraju “bolcmanovski”, dok se za jone pretpostavlja MB raspodela sa temperaturom gasa, međutim adekvatnost takvog pristupa zavisi od sistema/dela sistema koji se modeluje (npr. prihvatljivo za plazmu ali u daleko manjoj meri za prielektrodni sloj). Kao posledica eventualnog nedostatka baze preseka, postoje slučajevi gde se za elektrone koriste koeficijenti brzine u obliku (86), ali za specifične vrednosti T_e , dok je za širi opseg energija takva pretpostavka očigledno nekorektna.



Slika 25. Preseci za zahvat elektrona na O_2 , ekscitaciju i jonizaciju O_2 i He (Morgan, LXCat). BE EEDF za srednju energiju 2,5eV i koncentraciju elektrona 10^{11}cm^{-3} (puna crvena linija), 10^{15}cm^{-3} (tačkasta), 10^{17}cm^{-3} (isprekidana) i 10^{19}cm^{-3} (crta-tačka-crta). Proračun za smešu He 0,994, O_2 0,005, N_2 195ppm, H_2O 2,5ppm, $O_2(^1\Delta)$ 500ppm, $O_2(^1\Sigma)$ 10ppm, O 980ppm, N 1ppm. MB EEDF (plava linija), (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).



Slika 26. MB (puna plava linija) i BE (isprekidana crvena linija) koeficijenti brzine za ekscitaciju He i O_2 , jonizaciju He, O_2 i N_2 , za koncentraciju elektrona 10^{11}cm^{-3} (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

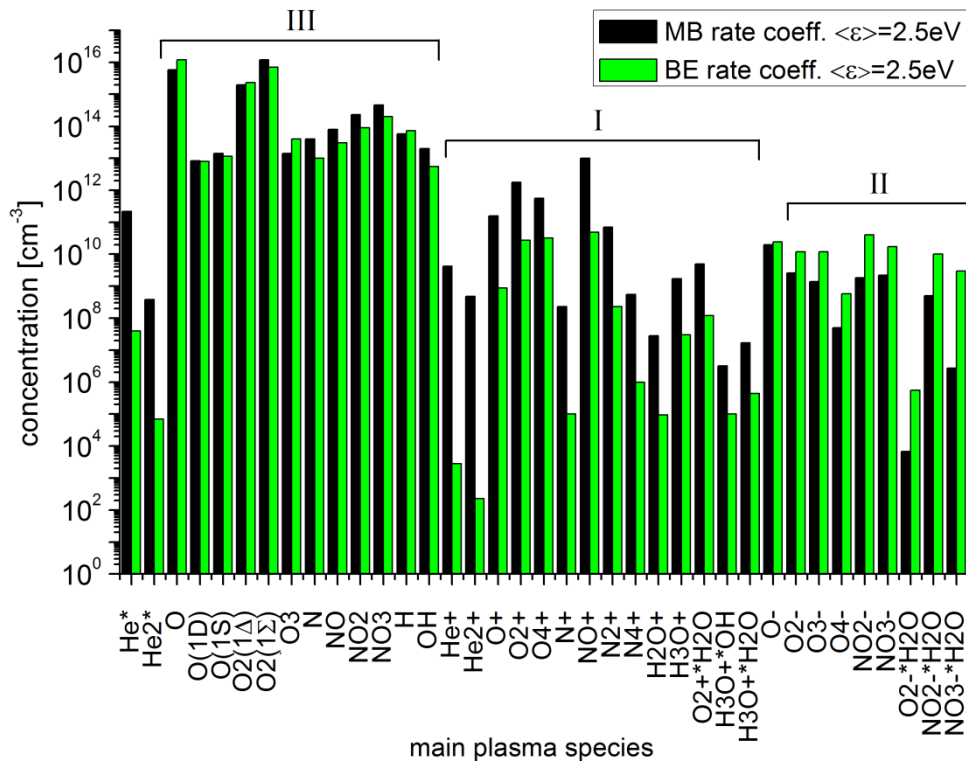


Slika 27. MB (puna plava linija) i BE (isprekidana crvena linija) koeficijenti brzine za disocijativni zahvat elektrona na O_2 , $\text{O}_2(^1\Delta)$, $\text{O}_2(^1\Sigma)$ a) i za tročestični zahvat sa He i O_2 kao trećim telom (prikazan kao za dvočestični) b), za koncentraciju elektrona 10^{11}cm^{-3} (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

Rezultati 0D globalnog modela pokazuju da izbor EEDF ima za posledicu drugačiji hemijski sastav formirane plazme. Na Slici 28. prikazane su koncentracije različitih reaktivnih neutrala, pozitivnih i negativnih jona, kao i njihovih klastera sa molekulima H_2O , izračunate za vremenski interval 5ms, na osnovu MB i BE koeficijenata brzine za konstantnu koncentraciju elektrona 10^{11}cm^{-3} (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

Na osnovu promene koncentracije sve vrste se mogu podeliti u tri grupe – I grupu čine pozitivni joni i metastabili He^* i He_2^* , čija je koncentracija u slučaju proračuna sa BE koeficijentima brzine značajno manja nego u proračunu sa MB koeficijentima, na osnovu čega sledi zaključak da se radi o vrstama na čiju kinetiku izražen uticaj imaju elektronski sudarni procesi (ekscitacije i jonizacije). Niža koncentracija za nekoliko redova veličine je posledica nižih vrednosti BE koeficijenata brzine za ove procese (Slika 26a-b). II grupu čine negativni joni čija je koncentracija u slučaju proračuna sa BE koeficijentima veća nego u slučaju proračuna sa MB koeficijentima. Ove razlike su prevashodno posledica niže koncentracije pozitivnih jona usled procesa rekombinacije i dolazi do porasta stepena elektronegativnosti. Konačno, u grupu III spadaju reaktivni neutrali, čija koncentracija ima približno istu vrednost u

slučaju proračuna sa BE i MB koeficijentima brzine. To može biti posledica nekoliko uzroka: ili elektronski sudarni procesi nemaju bitnu ulogu u kinetici ovih čestica, ili se radi o elektronskim sudarnim procesima sa niskim pragom (npr. $O_2(^1\Delta)$, $O_2(^1\Sigma)$), ili u BE proračunu dolazi do promene u ukupnim prinosima (dn_i/dt) i kod procesa proizvodnje i kod procesa gašenja tako da nema značajne promene u koncentraciji odgovarajuće vrste čestica.



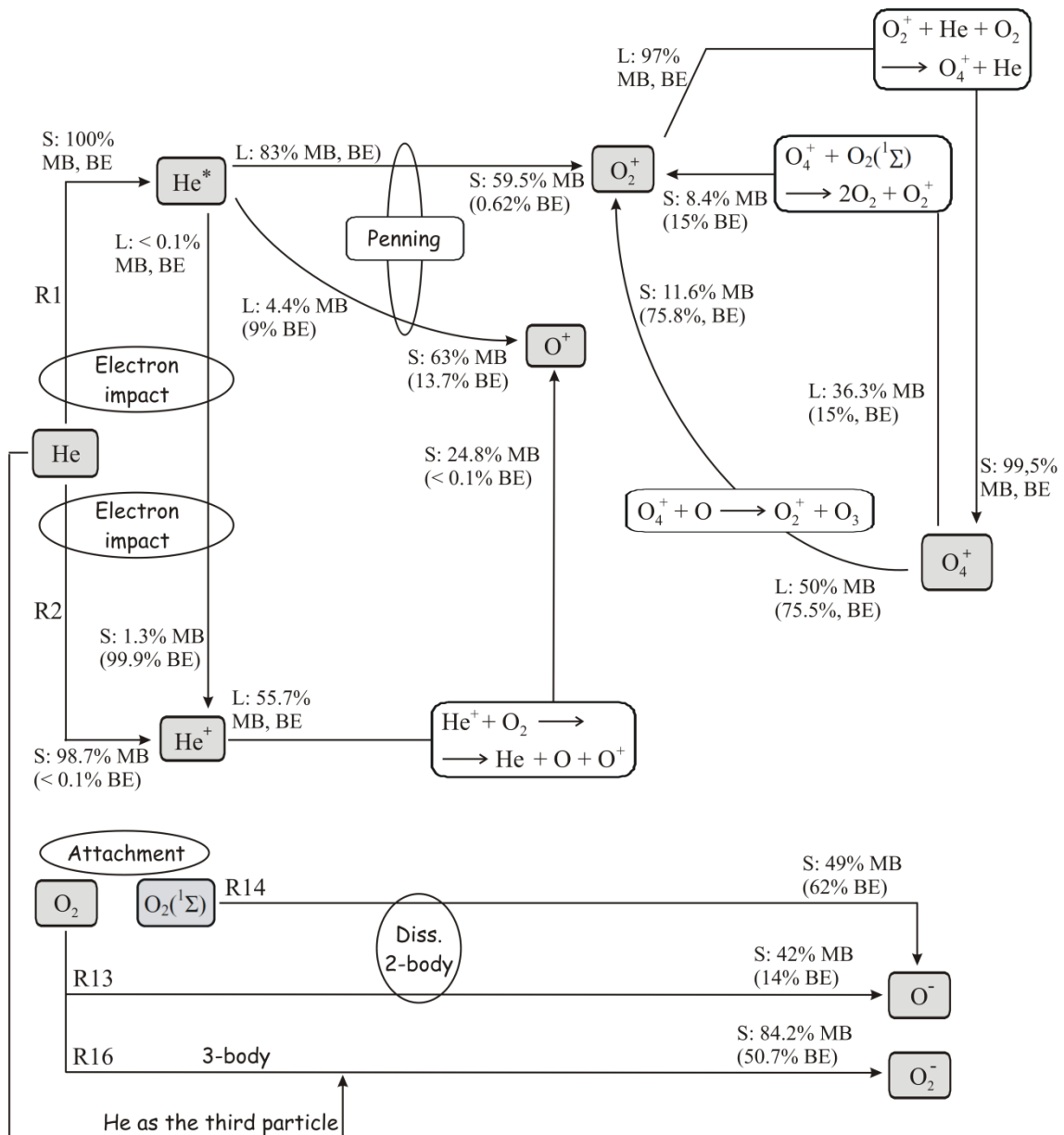
Slika 28. Poređenje hemijskog sastava plazme, izračunatog na osnovu globalnog modela, korišćenjem MB (crni barovi) i BE koeficijenata brzine (zeleni barovi) (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

6.1.2 Uticaj EEDF na glavne fizičke i hemijske procese

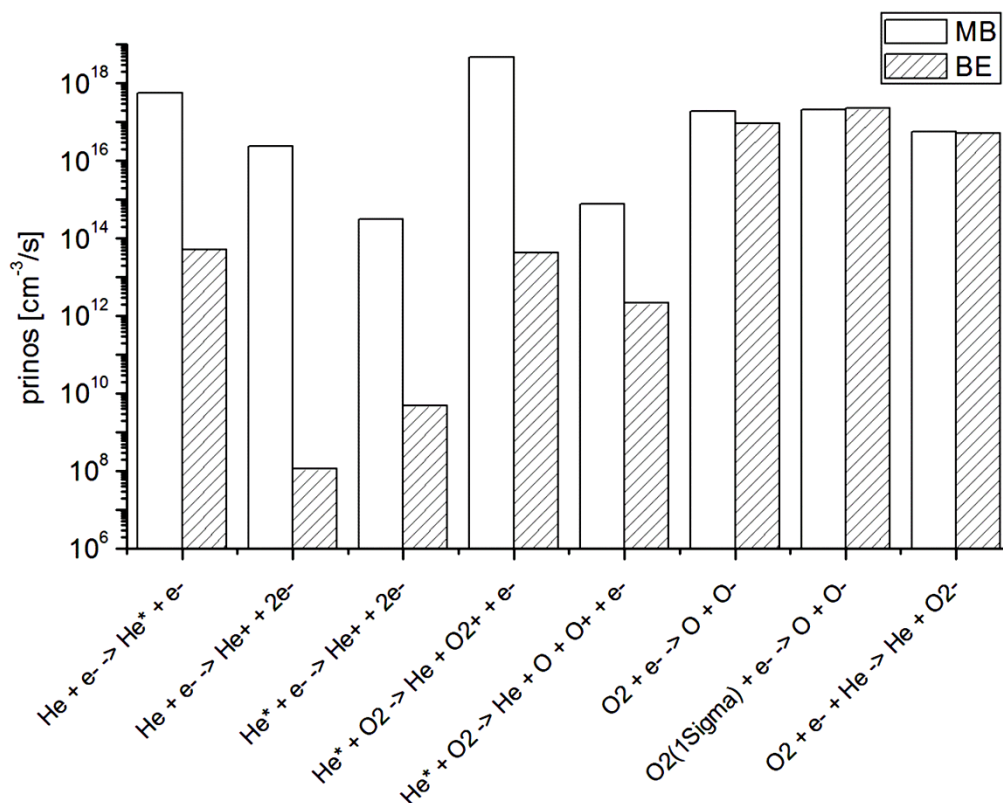
Na Slici 29. prikazani su glavni fizički i hemijski procesi u kinetici He^* , He^+ i jona kiseonika sa procentualnim doprinosima u ukupnoj proizvodnji (S) i gašenju (L), za slučaj proračuna sa MB i BE koeficijentima brzine i koncentraciju elektrona $n_e =$

10^{11}cm^{-3} (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Na Slici 30. prikazani su apsolutni prinosi ovih procesa za slučaj MB i BE proračuna. U skladu sa analizom prezentovanom u Odeljku 6.1.1, najizraženije razlike kod dominantnih procesa za nastanak i gašenje javljaju se kod elektronskih sudarnih procesa sa visokim pragom. U ravnotežnom (MB) slučaju ekscitacija i jonizacija elektronskim udarom atoma helijuma iz osnovnog stanja (reakcije R1 i R2 iz Tabele 2) predstavljaju dominantne procese proizvodnje metastabila He^* i jona He^+ . U neravnotežnom (BE) slučaju ekscitacija R1 je i dalje dominantni proces proizvodnje metastabila He^* , ali sa prinosom koji je manji četiri reda veličine nego u MB slučaju kao posledica manje vrednosti koeficijenta brzine (Slika 26a). Međutim, dominantnu ulogu u proizvodnji jona helijuma He^+ preuzima jonizacija iz metastabilnog stanja (prag $4,77\text{eV}$), sa nižim prinosom nego u MB slučaju usled niže koncentracije metastabila He^* .

Joni atoma i molekula kiseonika u MB slučaju većinski nastaju kroz procese Peningove jonizacije sa He^* ($\approx 60\%$) i transfera naelektrisanja sa He^+ ($\approx 25\%$). U BE slučaju Peningova jonizacija ima značajno niži procentualni doprinos u proizvodnji ovih jona zbog niže koncentracije He^* , 14% za O^+ i manje od 1% za O_2^+ . Peningova jonizacija molekula O_2 je i dalje glavni proces gašenja metastabila He^* ($\approx 80\%$). Glavni procesi nastanka jona O^+ u BE slučaju su jonizacija elektronskim udarom iz pobuđenih stanja $\text{O}(^1\text{S})$ i $\text{O}(^1\text{D})$ ($\approx 17\%$) i disocijativna jonizacija molekula O_2 ($\approx 65\%$). Međutim, usled nedostatka preseka u bazi Morgan LXCat, BE koeficijenti brzine za ove procese nisu bili izračunati pomoću programa BOLSIG+. Kao što je prikazano na Slici 29, postoji tesna povezanost hemijske kinetike jona O_2^+ i O_4^+ , međutim treba imati u vidu da se radi o hemijskim procesima koji se razvijaju u vremenskom intervalu reda milisekundi u formiranoj plazmi. Inicijalno, proizvodnja jona O_2^+ je određena procesom jonizacije elektronskim udarom i Peningovom jonizacijom, pri čemu je prinos prvog procesa veći obzirom na razliku u vrednosti EEDF u oblasti praga za jonizaciju kiseonika ($12,06\text{eV}$) i ekscitaciju helijuma ($19,8\text{eV}$) (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).



Slika 29. Glavni procesi za nastanak (S) i gašenje (L) He^{*}, He⁺ i jona kiseonika, sa procentualnim prinosima u slučaju proračuna sa MB i BE koeficijentima brzine (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).



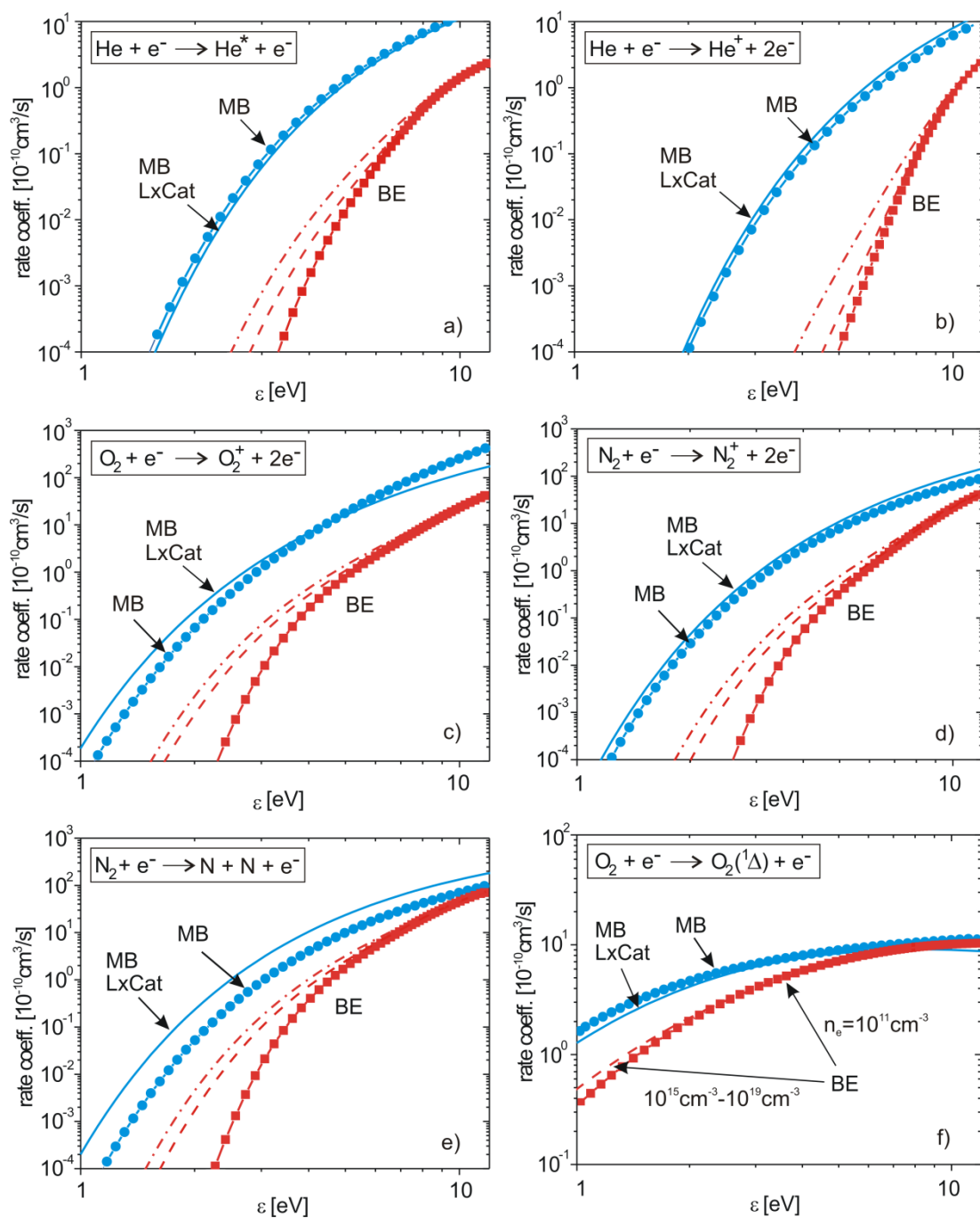
Slika 30. Apsolutni prinosi najvažnijih procesa za nastanak i gašenje He^{*}, He⁺ i jona kiseonika slučajju proračuna sa MB i BE koeficijentima brzine.

Negativni joni kiseonika nastaju u procesima zahvata, i to O⁻ jon disocijativnim zahvatom iz osnovnog O₂ i pobuđenog O₂(¹Σ) stanja (koje ima veću koncentraciju u odnosu na O₂(¹Δ), Slika 28), a O₂⁻ jon tročestičnim zahvatom uz He kao treće telo (koncentracija He kao većinskog gasa u smeši na 1atm iznosi 2,45 · 10¹⁹cm⁻³). U MB slučajju disocijativni zahvati iz osnovnog O₂ i pobuđenog stanja O₂(¹Σ) imaju približno isti procentualni doprinos u proizvodnji O⁻ jona iako je koncentracija O₂(¹Σ) niža u odnosu na O₂, zbog razlike u koeficijentima brzine (Slika 27a). U BE slučajju zahvat iz pobuđenog stanja O₂(¹Σ) ima većinski procentualni doprinos u proizvodnji jona O⁻ (60%). Procentualni doprinos tročestičnog zahvata u proizvodnji jona O₂⁻ u MB proračunu iznosi 84%, dok u BE slučajju ta vrednost opada na oko 50%, iako odgovarajući koeficijenti brzine imaju vrlo bliske vrednosti u intervalu energije 1,8eV-3,1eV (Slika 27b). Ova razlika se javlja usled veće koncentracije jona O₃⁻ (Slika 28) i procesa O₃⁻ + O → O₂ + O⁻, koji u BE slučajju ima veći doprinos u proizvodnji jona O⁻ (30%) nego u MB slučajju (3%) (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

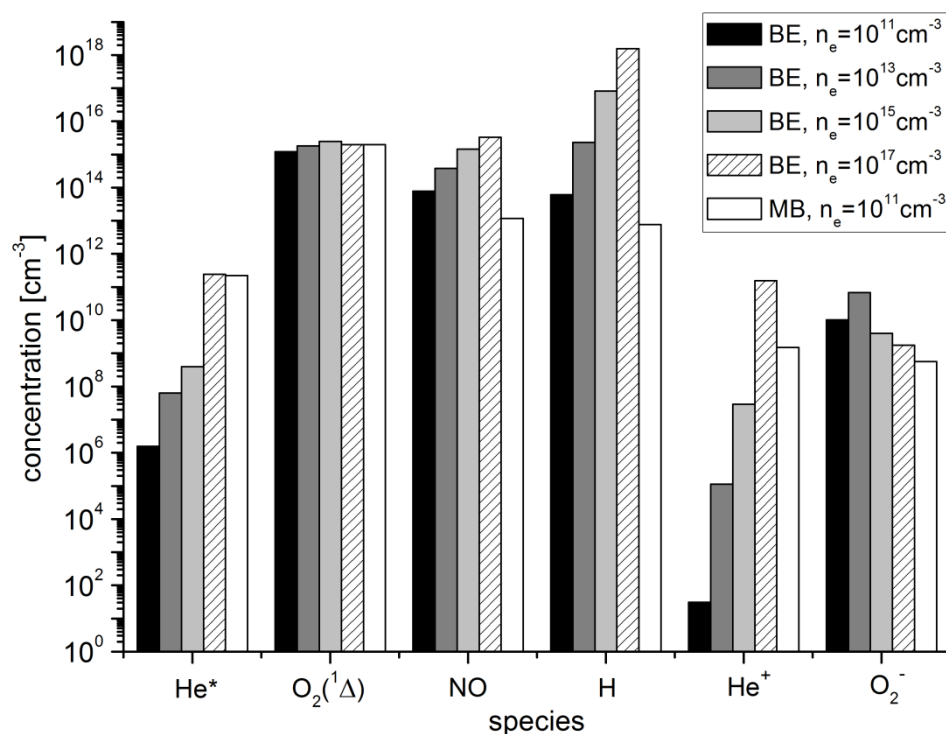
6.2 Uticaj koncentracije elektrona na EEDF i hemijski sastav plazme

Na osnovu rezultata prikazanih na Slici 25. sledi zaključak da se pri većim koncentracijama elektrona javljaju efekti maksvelijanzacije, međutim čak i za $n_e = 10^{19} \text{cm}^{-3}$ razlike u odnosu na MB raspodelu na visokim energijama ipak postoje. Proračun za ovako visoku koncentraciju elektrona je sproveden kao ilustracija ekstremnosti uslova pri kojima bi se moglo govoriti o MB EEDF, dok je u literaturi kao okvirno najveća vrednost koncentracije elektrona u LTP na atmosferskom pritisku navedena vrednost 10^{14}cm^{-3} (Bruggeman et al., 2016). Efekat maksvelijanzacije se preko EEDF takođe ogleda u većim vrednostima BE koeficijenata brzine, kao što je prikazano na Slici 31a-e) (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Kod procesa sa niskim pragom uticaj koncentracije elektrona na BE koeficijent brzine je neznan, Slika 31f). Takođe su prikazani koeficijenti brzine iz Tabele 2 (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a), kao i koeficijenti izračunati na osnovu MB raspodele i preseka iz baze Morgan, pomoću solvera dostupnog na sajtu baze LXCat (<http://www.lxcat.laplace.univ-tlse.fr>), označeni kao "MBLxCat". Njihovim poređenjem može se zaključiti da su koeficijenti iz Tabele 2 zaista određeni na osnovu MB raspodele iz istog ili sličnog seta preseka.

U cilju analize uticaja koncentracije elektrona na hemijski sastav plazme izvršen je proračun globalnim modelom za koncentracije elektrona 10^{13}cm^{-3} , 10^{15}cm^{-3} i 10^{17}cm^{-3} korišćenjem odgovarajućih koeficijenata brzine i rezultati su prezentovani za neke od vrsta na Slici 32 (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Tabele 3-8 sadrže pregled dominantnih procesa proizvodnje i gašenja za vrste prikazane na Slici 32, sa detaljima u vezi apsolutnih prinosa i procentualnih doprinosa za različite koncentracije elektrona (rezultati globalnog modela za BE koeficijente brzine).



Slika 31. Poređenje MB (plave linije) i BE koeficijena brzine (crvene linije) za procese označene na slikama a-f). BE koeficijenti za $n_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ (kvadratići), 10^{17} cm^{-3} (isprekidana linija) i 10^{19} cm^{-3} (crta-tačka-crta). MB koeficijenti: u Arenijusovoj formi iz Tabele 2 (plava linija sa kružićima) i MBLxCat (puna plava linija) izračunati pomoću solvera na sajtu baze LxCat (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).



Slika 32. Uticaj koncentracije elektrona na hemijski sastav plazme (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

Prema načinu kako povećanje koncentracije elektrona utiče na promenu u koncentraciji pojedinih komponenta plazme mogu se razlikovati nekoliko slučajeva. Kod vrsta čije koncentracije značajno rastu sa porastom koncentracije elektrona na povećani prinos u procesima proizvodnje pored koncentracije elektrona utiču i veće vrednosti koeficijenta brzine. To važi npr. za He*, He⁺ (Tabela 3 i 7), O⁺, O₂⁺, ali i H zbog procesa disocijacije OH radikala (Tabela 6). Vrste sa sporijim porastom u koncentraciji nastaju i gase se u hemijskim reakcijama na čije prinose indirektno utiče koncentracija elektrona. Proizvodnja NO je na većim koncentracijama elektrona (Tabela 5) određena rekombinacijom jona NO⁺ sa elektronima kao i reakcijama između molekula O₂ i pobuđenih atoma N(²D), koji nastaju u disocijaciji molekula N₂ elektronskim udarom. Međutim, koncentracija oksida NO sporije raste sa koncentracijom elektrona zato što na gašenje ove vrste takođe bitno utiču pobuđena stanja N(²D). Koncentracija metastabila O₂(¹Δ) je skoro ista pri svim koncentracijama elektrona, zato što se ekscitacija molekula O₂ elektronskim udarom, kao važan proces proizvodnje (Tabela 4), uravnotežava procesima gašenja sa pobuđenim atomima O(¹S) koji nastaju disocijacijom molekula O₂

i ekscitacijom atoma O elektronskim udarom. Konačno, koncentracije nekih vrsta najpre pokazuju porast, a zatim opadanje sa porastom koncentracije elektrona. Kao primer može se navesti jon O_2^- , zato što su na većim koncentracijama elektrona dominantni mehanizmi gašenja rekombinacije sa jonima O^+ , O_2^+ i N_2^+ (Tabela 8), usled povećanih prinosa za jonizacije molekula O_2 i N_2 (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

Tabela 3. Glavni procesi nastanka (S) i gašenja (L) za He^* sa prinosima u zavisnosti od koncentracije elektrona.

He^*	proces	$10^{13}cm^{-3}$	$10^{15}cm^{-3}$	$10^{17}cm^{-3}$	$10^{19}cm^{-3}$
S	$He + e^- \rightarrow He^* + e^-$	100%	99,87%	91,8%	52%
		$5,2 \cdot 10^{15}cm^{-3}/s$	$4,8 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	$3,7 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	$1,8 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$
	$He^+ + e^- + He \rightarrow He^* + He$	0,0%	0,0%	8,1%	29,5%
				$3,3 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	$1,0 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$
	$He^+ + e^- + e^- \rightarrow He^* + e^-$	0,0%	0,0%	0,0%	18,5%
					$6,3 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$
	ukupno:	100%	99,87%	99,9%	100%
		$5,2 \cdot 10^{15}cm^{-3}/s$	$4,8 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	$4,0 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	$3,5 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$
L	$He^* + O \rightarrow He + O^+ + e^-$	51,5%	85,3%	50,7%	7,7%
		$2,7 \cdot 10^{15}cm^{-3}/s$	$4,1 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	$2,0 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	$2,7 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$
	$He^* + O_2 \rightarrow He + O_2^+ + e^-$	33,44%	2,3%	<1%	0,0%
		$1,8 \cdot 10^{15}cm^{-3}/s$	$1,1 \cdot 10^{16}cm^{-3}/s$		
	$He^* + O_2(^1\Sigma) \rightarrow He + O_2^+ + e^-$	11,2%	<1%	<1%	0,0%
		$5,9 \cdot 10^{14}cm^{-3}/s$			
	$He^* + O(^1D) \rightarrow He + O^+ + e^-$	<1%	4,8%	12,8%	2,8%
			$2,3 \cdot 10^{16}cm^{-3}/s$	$5,2 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	
$He^* + O(^1S) \rightarrow He + O^+ + e^-$	<1%	1,7%	12,6%	22,6%	
			$5,1 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	$7,9 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	
$He^* + e^- \rightarrow He^+ + 2e^-$	<1%	2,6%	19%	55,4%	
		$1,2 \cdot 10^{16}cm^{-3}/s$	$7,6 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	$1,9 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	
$He^* + e^- \rightarrow He + e^-$	<1%	<1%	3,9%	11,34%	
				$4 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	
	ukupno:	96,14%	94,7%	95%	97%
		$5,0 \cdot 10^{15}cm^{-3}/s$	$4,6 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	$3,8 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	$3,4 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$

Tabela 4. Glavni procesi nastanka (S) i gašenja (L) za $O_2(^1\Delta)$ sa prinosima u zavisnosti od koncentracije elektrona.

$O_2(^1\Delta)$	proces	$10^{13}cm^{-3}$	$10^{15}cm^{-3}$	$10^{17}cm^{-3}$	$10^{19}cm^{-3}$
S	$O_2(^1\Sigma) + O \rightarrow O + O_2(^1\Delta)$	41% $4,5 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	17,1% $2,2 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	<1% $8,2 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	<0,1%
	$O_2 + O(^1D) \rightarrow O + O_2(^1\Delta)$	16,7% $1,9 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	24,75% $3,1 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	11,5% $1,1 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	1,14% $8,5 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$
	$He + O + O \rightarrow He + O_2(^1\Delta)$	5,1% $5,6 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	26,3% $3,3 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	21,64% $2,2 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	7,7% $5,7 \cdot 10^{25}cm^{-3}/s$
	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	28,65% $3,2 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	25,05% $3,2 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	32,2% $3,2 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	43% $3,2 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$
	$O + O + O \rightarrow O + O_2(^1\Delta)$	<1%	3,2% $4,0 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	21,1% $2,1 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	38,73% $2,9 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$
	$O_2(v_1-v_4) + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	<0,1%	<1%	5,3% $5,2 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	8,53% $6,3 \cdot 10^{25}cm^{-3}/s$
	$O_2^+ + O(^1D) \rightarrow O^+ + O_2(^1\Delta)$	0,0%	<1%	6,76% $6,7 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	<1%
	ukupno:	91,65% $1,1 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	96,45% $1,3 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	99,3% $9,9 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	100% $7,4 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$
L	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	2,1% $2,3 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	2,5% $3,2 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	2,6% $2,6 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	4,1% $3,1 \cdot 10^{25}cm^{-3}/s$
	$O_2(^1\Delta) + O(^1S) \rightarrow 3O$	4,8% $5,3 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	5% $6,4 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	5,15% $5,1 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	5% $3,7 \cdot 10^{25}cm^{-3}/s$
	$O_2(^1\Delta) + O(^1S) \rightarrow O + O_2$	16,5% $1,8 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	17,4% $2,2 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	17,7% $1,8 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	17,3% $1,3 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$
	$O_2(^1\Delta) + O(^1S) \rightarrow O + O_2(^1\Sigma)$	19,5% $2,2 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	20,6% $2,6 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	20,9% $2,1 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	20,45% $1,5 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$
	$O_2(^1\Delta) + O(^1S) \rightarrow O(^1D) + O_2$	5,4% $6 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	5,7% $7,2 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	5,8% $5,8 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	5,66% $4,2 \cdot 10^{25}cm^{-3}/s$
	$O_2(^1\Delta) + O(^1S) \rightarrow O(^1D) + O_2(^1\Sigma)$	43,51% $4,8 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	45,9% $5,8 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	46,6% $4,6 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	45,6% $3,4 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$
	$O_2(^1\Delta) + O + He \rightarrow O_2 + O + He$	5,66% $6,3 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	1,64% $2,1 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	<1%	<1%
	ukupno:	99% $1,1 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$	97,8% $1,3 \cdot 10^{23}cm^{-3}/s$	98,75% $9,9 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$	98,11% $7,3 \cdot 10^{26}cm^{-3}/s$

Tabela 5. Glavni procesi nastanka (S) i gašenja (L) za NO sa prinosima u zavisnosti od koncentracije elektrona.

NO	proces	10^{13}cm^{-3}	10^{15}cm^{-3}	10^{17}cm^{-3}	10^{19}cm^{-3}
S	$\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}$	60,6% $1,3 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	20,14% $5,3 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<1%	<0,1%
	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}$	15,87% $3,3 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	36,8% $9,7 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	5,2% $2,0 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1%
	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{NO}_2 \rightarrow 2\text{O} + \text{NO}$	3,7% $7,7 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	4,5% $1,2 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	1,7% $6,6 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1%
	$\text{H} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$	13,9% $2,9 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	6,7% $1,8 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<1%	<0,1%
	$\text{He} + \text{O} + \text{N} \rightarrow \text{He} + \text{NO}$	1%	9,5% $2,5 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	22,9% $9 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	2% $1,7 \cdot 10^{27}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{O}_2 + \text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + \text{NO}$	1,1%	10,1% $2,7 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	49,2% $1,9 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	11% $9,3 \cdot 10^{27}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{O}_2 + \text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{O} + \text{NO}$	<1%	2,5% $6,7 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	12,3% $4,8 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	2,75% $2,3 \cdot 10^{27}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{NO}^+ + \text{e}^- + \text{e}^- \rightarrow \text{NO} + \text{e}^-$	0,0%	0,0%	<1%	83% $7 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	ukupno:	94,07% $2 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	91,45% $2,5 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	93% $3,6 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	98,5% $8,3 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
L	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}$	34,4% $8,4 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	61,1% $5,5 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	12,7% $4,5 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1%
	$\text{NO}_3 + \text{NO} \rightarrow 2\text{NO}_2$	6,4% $1,6 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<1%	<1%	<0,1%
	$\text{He} + \text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_2$	53,3% $1,3 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	13,6% $1,2 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<1%	<0,1%
	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$	1%	11,2% $1 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	46,3% $1,7 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	54,1% $4,6 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2$	<1%	2,8% $2,5 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	11,6% $4,1 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	13,5% $1,1 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{O}(^1\text{S}) + \text{N}_2$	<1%	2,8% $2,5 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	11,6% $4,1 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	13,5% $1,1 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{N}(^2\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$	<1%	3,75% $3,4 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	15,4% $5,5 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	18% $1,5 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	ukupno:	95,5% $2,4 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	97,7% $8,9 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	98,76% $3,5 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,2% $8,4 \cdot 10^{28}\text{cm}^{-3}/\text{s}$

Tabela 6. Glavni procesi nastanka (S) i gašenja (L) za H sa prinosima u zavisnosti od koncentracije elektrona.

H	proces	10^{13}cm^{-3}	10^{15}cm^{-3}	10^{17}cm^{-3}	10^{19}cm^{-3}
S	$e^- + \text{OH} \rightarrow e^- + \text{O} + \text{H}$	1,2% $6,9 \cdot 10^{18}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	4,4% $2,3 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	27,2% $8,9 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	63,34% $2,3 \cdot 10^{26}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{O} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	96,66% $5,6 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	86,6% $4,6 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	43,2% $1,4 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	5,2% $1,9 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{O}(^1\text{D}) + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	1%	5,83% $3,1 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	13,13% $4,3 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	2,3% $8,4 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{O}(^1\text{S}) + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	<1%	2,13% $1,1 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	12,9% $4,2 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	18,4% $6,8 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{N}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{H}$	<0,1%	<0,1%	<1%	8,1% $3 \cdot 10^{25}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	ukupno:	97,86% $1,2 \cdot 10^{21}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	98,96% $5,2 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	96,33% $3,3 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	95% $3,6 \cdot 10^{26}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
L	$\text{NO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$	50,65% $2,9 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	33,8% $1,8 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	5,86% $1,9 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	1,6% $5,8 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{NO}_3 + \text{H} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	44,76% $2,6 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	28,86% $1,5 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	4,28% $1,4 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	0,6% $2,2 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He} + \text{O} + \text{H} \rightarrow \text{He} + \text{OH}$	3,9% $2,2 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	36,81% $1,9 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	89,3% $2,9 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	96,4% $3,6 \cdot 10^{26}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	ukupno:	99,3% $5,7 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,47% $5,2 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,44% $3,3 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	98,6% $3,6 \cdot 10^{26}\text{cm}^{-3}/\text{s}$

Tabela 7. Glavni procesi nastanka (S) i gašenja (L) za He^+ sa prinosima u zavisnosti od koncentracije elektrona.

He^+	proces	10^{13}cm^{-3}	10^{15}cm^{-3}	10^{17}cm^{-3}	10^{19}cm^{-3}
S	$\text{He}^* + e^- \rightarrow \text{He}^+ + 2e^-$	99,94% $2 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	100% $1,2 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,9% $7,6 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,8% $1,9 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	ukupno:	99,94% $2 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	100% $1,2 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,9% $7,6 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	99,8% $1,9 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
L	$\text{He}^+ + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}^+$	3,74% $9,9 \cdot 10^{11}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	44% $6,2 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	34,4% $2,7 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	2,23% $4,3 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}^+$	51,93% $1,4 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	25,11% $3,5 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	2,44% $1,9 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1% $6 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_2^+$	1,6% $4,2 \cdot 10^{11}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<1% $1,1 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1% $5,8 \cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1% $1,8 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{He} + \text{O}^+$	<0,1%	2,5% $3,5 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	8,7% $6,7 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<1% $1,6 \cdot 10^{22}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + \text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{He} + \text{O}^+$	<0,1%	1% $1,3 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	8,55% $6,6 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	6,6% $1,3 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He}_2^+$	38,1% $1,0 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	18,4% $2,6 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	1,8% $1,4 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	<0,1% $4,4 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + e^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He}^*$	0,1%	4,4% $6,1 \cdot 10^{14}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	42,4% $3,3 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	53,2% $1 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	$\text{He}^+ + e^- + e^- \rightarrow \text{He}^* + e^-$	0,0%	0,0%	0,3% $2,3 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	32,7% $6,3 \cdot 10^{23}\text{cm}^{-3}/\text{s}$
	ukupno:	94,6% $2,6 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	95,4% $1,3 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	94% $7,3 \cdot 10^{20}\text{cm}^{-3}/\text{s}$	95% $1,9 \cdot 10^{24}\text{cm}^{-3}/\text{s}$

Tabela 8. Glavni procesi nastanka (S) i gašenja (L) za O_2^- sa prinosima u zavisnosti od koncentracije elektrona.

O_2^-	proces	$10^{13}cm^{-3}$	$10^{15}cm^{-3}$	$10^{17}cm^{-3}$	$10^{19}cm^{-3}$
S	$O_3 + e^- \rightarrow O + O_2^-$	4,3% $2,9 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	6,5% $3,6 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	1,75% $9,2 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	<0,1%
	$O_3^- + O \rightarrow O_2 + O_2^-$	13,1% $8,9 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	<0,1%	<0,1%	<0,1%
	$O^- + O_2 \rightarrow O + O_2^-$	1,6% $1,1 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	<0,1%	<0,1%	<0,1%
	$O^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O_2^-$	2% $1,3 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	<0,1%	<0,1%	<0,1%
	$e^- + O_2 + He \rightarrow He + O_2^-$	76% $5,2 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	93,23% $5,2 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	98,2% $5,2 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	99,94% $5,2 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$
	ukupno:	97% $6,6 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	99,7% $5,5 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	99,9% $5,3 \cdot 10^{22}cm^{-3}/s$	99,94% $5,2 \cdot 10^{24}cm^{-3}/s$
L	$O_2^- + O \rightarrow O_2 + O^-$	31,4% $1,8 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	6,86% $2,6 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	1% $9,1 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	0,2% $4,7 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + O \rightarrow O_3 + e^-$	31,4% $1,8 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	6,86% $2,6 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	1% $9,1 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	0,2% $4,7 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow 2O_2 + e^-$	16,4% $9,4 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	0,3% $1,1 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	<0,1%	<0,01% $6,6 \cdot 10^{14}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + O_2^+ + O_2 \rightarrow 3O_2$	3,6% $2,1 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	49,1% $1,9 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	50,14% $4,7 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	2% $6 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + N_2^+ \rightarrow O_2 + N + N$	9,4% $5,4 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	20,58% $7,7 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	15,78% $1,5 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	14% $4,1 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + O_4^+ \rightarrow 2O_2 + O + O$	0,5% $2,4 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	6,44% $2,4 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	6,58% $6,1 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	0,3% $7,9 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + NO^+ \rightarrow O_2 + NO$	1,7% $1,4 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	3,7% $1,4 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	2,8% $2,6 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	2,5% $7,4 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + NO^+ \rightarrow O_2 + N + O$	<0,1%	<0,1%	1,1%	56,3% $1,7 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + e^-$	<0,1%	<0,1%	0,5%	8,1% $2,4 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$
	$O_2^- + O^+ + O_2 \rightarrow O + 2O_2$	0,3% $6,7 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	1,8% $6,7 \cdot 10^{17}cm^{-3}/s$	16,14% $1,5 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	12,5% $3,7 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$
	ukupno:	92,2% $5,3 \cdot 10^{18}cm^{-3}/s$	95,34% $3,6 \cdot 10^{19}cm^{-3}/s$	94% $8,7 \cdot 10^{20}cm^{-3}/s$	95,4% $2,9 \cdot 10^{21}cm^{-3}/s$

7. GLOBALNI MODEL SA PRORAČUNOM TEMPERATURE ELEKTRONA

7.1 Proračun temperature za slučaj zadate koncentracije elektrona

Model iz rada (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) modifikovan je po analogiji sa modelima iz radova (van Gaens, Bogaerts, 2013; Dorai, Kushner, 2003), uključivanjem jednačine za proračun temperature elektrona u funkciji vremena, na osnovu jednačine (82) koja u slučaju zadate konstantne koncentracije elektrona ima oblik:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2S_{abs}}{3en_e} - \sum_i k_{ei}^{el} n_i \frac{2m_e}{M_i} (T_e - T_g^e) - \frac{2}{3} \sum_j k_{ej}^{inel} n_j \varepsilon_{ej}^{thr} . \quad (87)$$

Proračun je sproveden za slučaj smeše He + 0,5% O₂ sa 250ppm vlažnog vazduha i rezultati su poređeni sa rezultatima 1D fluidnog modela koji uključuje 20 vrsta i 184 reakcija za He/O₂ mikro-mlaz iz rada (Niemi et al., 2011), kao i sa rezultatima merenja na osnovu strujno-naponske karakteristike He/O₂ mikro-mlaza iz rada (Park et al., 2001). Interval vrednosti za zapreminsku gustinu apsorbovane snage $13,3 \text{ W/cm}^3 \leq S_{abs} \leq 33,3 \text{ W/cm}^3$ procenjen je na osnovu korišćenih vrednosti snage u 1D simulaciji 0,4 – 1W, kao i podatka o karakterističnim dimenzijama sistema 1mm × 1mm × 30mm. Vrednost za gustinu snage 20,8 W/cm³ koja je procenjena na osnovu V-I karakteristike pražnjenja nalazi se približno na sredini tog intervala (Park et al., 2001). Pri datim uslovima za temperaturu i koncentraciju elektrona navedeni su podaci $T_e \cong 2\text{eV}$ i $n_e \cong 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ (Niemi et al., 2011; Park et al., 2001).

Procesi za koje su uračunati energijski gubici u jednačini (87) svrstani su u Tabeli 9. sa odgovarajućim energijskim pragovima, procenjenim na osnovu podataka za preseke iz baza LXCat i QDB. BE koeficijenti brzine su preuzeti iz Tabele 2, dok su za preostale procese iz Tabele 9. preuzeti iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a). Tako dobijeni rezultati globalnog modela sa proračunom temperature elektrona su poređeni sa rezultatima modela iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) kako bi se analizirale najvažnije promene u hemijskom sastavu plazme izazvane načinom na koji se određuje temperatura elektrona u modelu.

Tabela 9. Elektronski sudarni procesi sa energijskim pragovima, uključeni u proračun temperature elektrona.

br.	reakcija	prag [eV]
disocijacije		
R1	$O_2 + e^- \rightarrow O + O + e^-$	4,6
R2	$O_2 + e^- \rightarrow O + O(^1D) + e^-$	6,1
R3	$O_2 + e^- \rightarrow O + O(^1S) + e^-$	8,0
R4	$O_2 + e^- \rightarrow O(^1D) + O(^1D) + e^-$	8,0
R5	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O + O + e^-$	3,6
R6	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O + O(^1D) + e^-$	5,12
R7	$O_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow O + O + e^-$	2,96
R8	$O_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow O + O(^1D) + e^-$	4,46
R9	$N_2 + e^- \rightarrow N + N + e^-$	9,7
R10	$N_2 + e^- \rightarrow N + N(^2D) + e^-$	12,5
R11	$N_2 + e^- \rightarrow N + N(^2P) + e^-$	14,5
R12	$H_2O + e^- \rightarrow O + OH(X) + e^-$	7,6
ekscitacije		
R13	$He + e^- \rightarrow He^* + e^-$	19,8
R14	$O + e^- \rightarrow O(^1D) + e^-$	2,0
R15	$O + e^- \rightarrow O(^1S) + e^-$	4,19
R16	$N + e^- \rightarrow N(^2D) + e^-$	2,38
R17	$N + e^- \rightarrow N(^2P) + e^-$	3,57
R18	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	0,98
R19	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	1,64
R20	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	0,7
R21	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(v=1) + e^-$	0,19
R22	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(v=2) + e^-$	0,56
R23	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(v=3) + e^-$	0,57
R24	$O_2 + e^- \rightarrow O_2(v=4) + e^-$	0,75
R25	$N_2 + e^- \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	0,29
R26	$N_2 + e^- \rightarrow N_2(v=2) + e^-$	0,59
R27	$N_2 + e^- \rightarrow N_2(v=3) + e^-$	0,88
R28	$N_2 + e^- \rightarrow N_2(v=4) + e^-$	1,17
R29	$O_2(v=1) + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	0,79
R30	$O_2(v=1) + e^- \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	1,45
R31	$O_2(v=2) + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	0,6
R32	$O_2(v=2) + e^- \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	1,26
R33	$O_2(v=3) + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	0,41
R34	$O_2(v=3) + e^- \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	1,07
R35	$O_2(v=4) + e^- \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	0,23

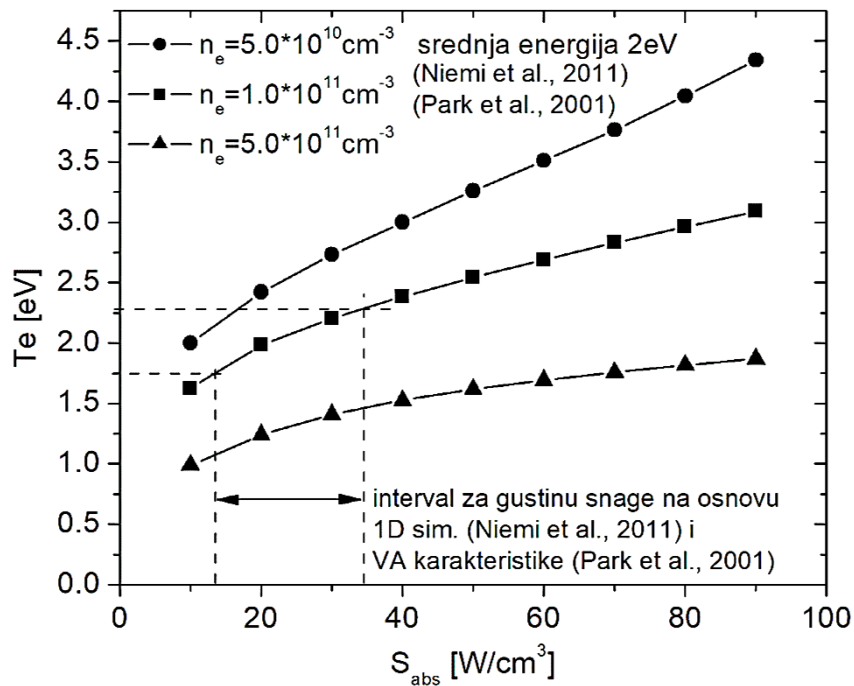
R36	$O_2(v=4) + e^- \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	0,89
R37	$N_2(v=1) + e^- \rightarrow N_2(v=2) + e^-$	0,43
R38	$N_2(v=1) + e^- \rightarrow N_2(v=3) + e^-$	0,6
R39	$N_2(v=1) + e^- \rightarrow N_2(v=4) + e^-$	0,8
jonizacije		
R40	$He + e^- \rightarrow He^+ + 2e^-$	24,6
R41	$He^* + e^- \rightarrow He^+ + 2e^-$	4,78
R42	$O + e^- \rightarrow O^+ + 2e^-$	13,62
R43	$N + e^- \rightarrow N^+ + 2e^-$	14,5
R44	$O(^1D) + e^- \rightarrow O^+ + 2e^-$	11,7
R45	$O(^1S) + e^- \rightarrow O^+ + 2e^-$	9,0
R46	$N(^2D) + e^- \rightarrow N^+ + 2e^-$	12,2
R47	$O_2 + e^- \rightarrow O_2^+ + 2e^-$	12,06
R48	$O_2 + e^- \rightarrow O + O^+ + 2e^-$	17,0
R49	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O_2^+ + 2e^-$	11,08
R50	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O + O^+ + 2e^-$	16,0
R51	$O_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow O_2^+ + 2e^-$	10,43
R52	$O_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow O + O^+ + 2e^-$	15,36
R53	$N_2 + e^- \rightarrow N_2^+ + 2e^-$	15,5
R54	$N_2 + e^- \rightarrow N + N^+ + 2e^-$	24,34
R55	$NO + e^- \rightarrow NO^+ + 2e^-$	9,3
R56	$NO + e^- \rightarrow N + O^+ + 2e^-$	20,25
R57	$NO + e^- \rightarrow O + N^+ + 2e^-$	21,1
disocijativni zahvati elektrona		
R58	$O_2 + e^- \rightarrow O + O^-$	5,38
R59	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O + O^-$	3,5
R60	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O(^1D) + O^-$	5,5
R61	$O_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow O + O^-$	2,85
R62	$O_3 + e^- \rightarrow O + O_2^-$	0,25
R63	$O_3 + e^- \rightarrow O_2 + O^-$	0,025
tročestični zahvati elektrona		
R64	$O_2 + e^- + M \rightarrow O_2^- + M$ M=He, N ₂ , O ₂ , H ₂ O, CO ₂ , O	0,073
supereleastični sudari		
R65	$He^* + e^- \rightarrow He + e^-$	-19,8
R66	$O(^1D) + e^- \rightarrow O + e^-$	-1,97
R67	$N(^2D) + e^- \rightarrow N + e^-$	-2,38
R68	$N(^2P) + e^- \rightarrow N + e^-$	-3,57
R69	$N(^2P) + e^- \rightarrow N(^2D) + e^-$	-1,19
R70	$O_2(^1\Delta) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	-0,98

R71	$O_2(^1\Sigma) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	-1,64
R72	$O_2(v=1) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	-0,19
R73	$O_2(v=2) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	-0,56
R74	$O_2(v=3) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	-0,57
R75	$O_2(v=4) + e^- \rightarrow O_2 + e^-$	-0,75
R76	$N_2(v=1) + e^- \rightarrow N_2 + e^-$	-0,29
R77	$N_2(v=2) + e^- \rightarrow N_2 + e^-$	-0,59
R78	$N_2(v=3) + e^- \rightarrow N_2 + e^-$	-0,88
R79	$N_2(v=4) + e^- \rightarrow N_2 + e^-$	-1,17
R80	$N_2(v=2) + e^- \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	-0,43
R81	$N_2(v=3) + e^- \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	-0,6
R82	$N_2(v=4) + e^- \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	-0,8

Na Slici 33. prikazana je temperatura elektrona izračunata pomoću 0D globalnog modela nakon 5ms u funkciji gustine apsorbovane snage i koncentracije elektrona. Za $n_e = 10^{11} \text{cm}^{-3}$ u intervalu apsorbovane snage iz (Niemi et al., 2011) postoji dobro slaganje izračunate vrednosti temperature sa podatkom $T_e \cong 2\text{eV}$. Za vrednost gustine snage od $20,8 \text{W/cm}^3$ iz (Park et al., 2001) izračunata temperatura elektrona na osnovu (87) iznosi $2,1\text{eV}$. Pored toga, vrednosti elektronske koncentracije i gustine snage su varirane kako bi se analizirao njihov uticaj na temperaturu elektrona. Za istu vrednost apsorbovane snage pri povećanju koncentracije temperatura elektrona opada. Sa porastom gustine apsorbovane snage temperatura elektrona raste ali sporije na većim koncentracijama.

U analizi ovih rezultata pored zavisnosti $T_e \sim S_{abs}/n_e$ u jednačini (87) treba takođe imati u vidu da koeficijenti brzine k_e^{inel} , koji bitno utiču na prinose procesa u kojima elektroni gube energiju, zavise od energije elektrona na složen način i da su promene u njihovim vrednostima sa energijom izraženije u slučaju procesa sa većim pragom (Slika 26, 27 i 31). Pored toga, jednačina balansa energije (87) se rešava samousaglašeno sa sistemom jednačina za koncentracije komponenata plazme (85) od kojih neke, posebno one sa većom koncentracijom, bitno utiču kako na ukupne prinose procesa u kojima elektroni gube ili dobijaju energiju, tako i na EEDF i koeficijente brzine. Drugim rečima, jednačina (87) daje optimalnu vrednost temperature elektrona za koju, pri odgovarajućim radnim uslovima, dolazi do uspostavljanja složene ravnoteže između različitih procesa koji dovode do porasta i smanjenja energije elektrona.

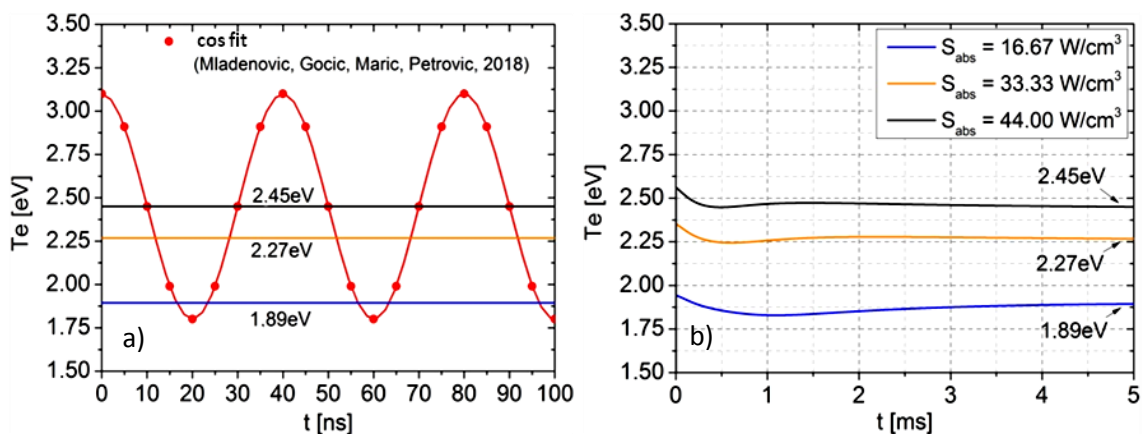
Detaljna analiza ovih procesa biće prezentovana u Poglavlju 9, na osnovu proračuna sa BE koeficijentima brzine za sve elektronske sudarne procese.



Slika 33. Temperatura elektrona u funkciji gustine apsorbovane snage i koncentracije elektrona, na osnovu BE koeficijenata brzine kao u (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

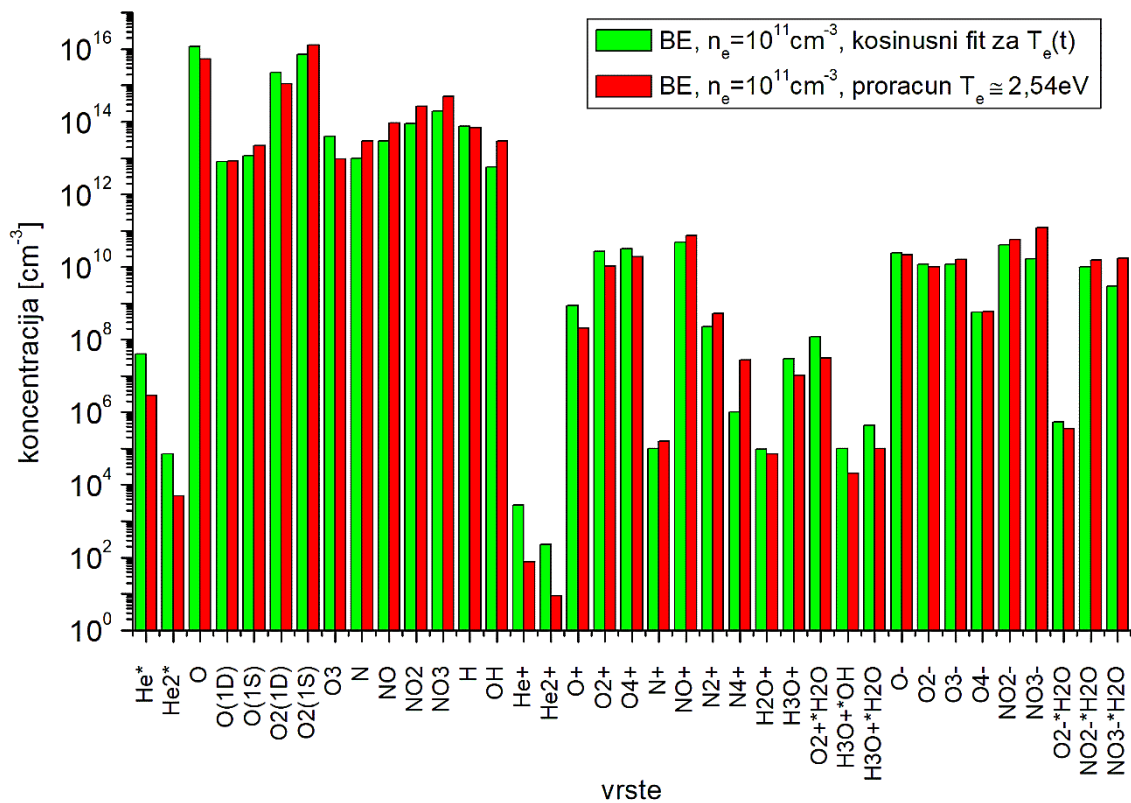
7.2 Uticaj temperature elektrona na hemijski sastav plazme

Vrednosti temperature elektrona koje se dobijaju na osnovu jednačine (87) sa procesima iz Tabele 9, za interval gustine snage $13,3 \text{ W/cm}^3 \leq S_{abs} \leq 33,3 \text{ W/cm}^3$ i koncentraciju elektrona $n_e = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, leže u intervalu $1,89 \text{ eV} \leq T_e \leq 2,27 \text{ eV}$. U cilju poređenja hemijskog sastava plazme sa onim na osnovu modela koji koristi kosinusni fit za $T_e(t)$ iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) prikazanim na Slici 34a), proračun je takođe izvršen za nešto višu vrednost gustine snage od 44 W/cm^3 kojoj odgovara srednja energija fita od $2,45 \text{ eV}$. Stacionarne vrednosti srednje energije se u proračunu uspostavljaju nakon nekoliko milisekundi od početka simulacije, kao što je prikazano na Slici 34b). Ove vrednosti su takođe označene na Slici 34a) radi poređenja sa vrednostima kosinusnog fita. U proračunu su korišćeni BE koeficijenti brzine elektronskih sudarnih procesa iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018).

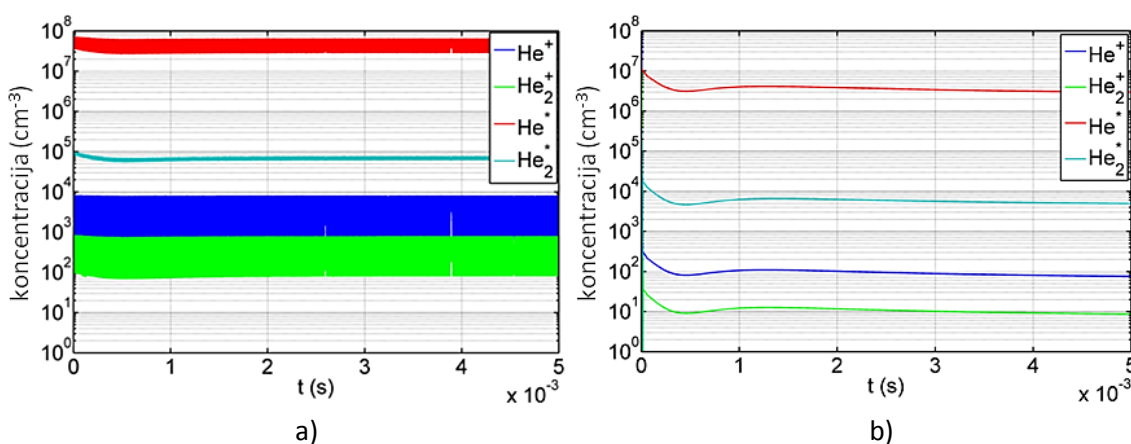


Slika 34. Sinusoidalni fit za $T_e(t)$ a), temperatura elektrona u zavisnosti od vremena na osnovu 0D globalnog modela za tri vrednosti gustine apsorbovane snage b).

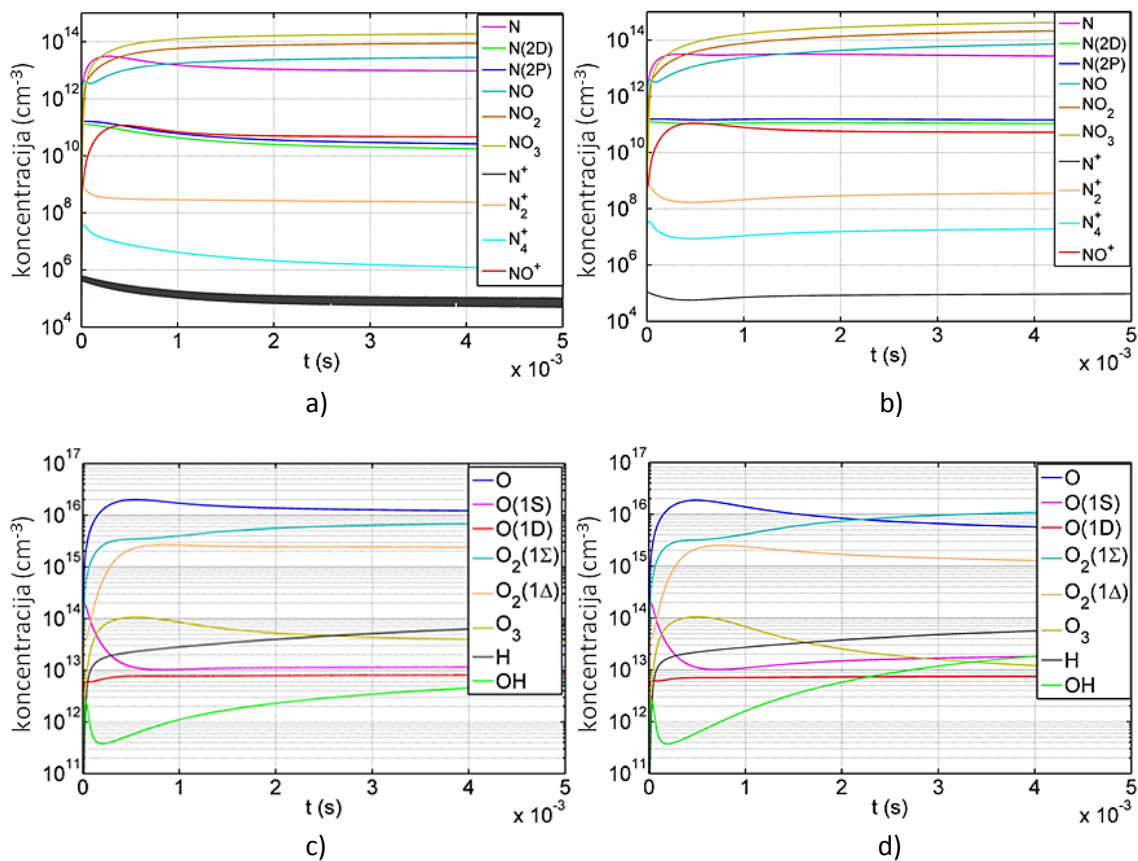
Slika 35. prikazuje poređenje koncentracija najvažnijih komponenata plazme izračunatih 0D globalnim modelom sa proračunom temperature elektrona, nakon 5ms od početka simulacije za gustinu snage 44 W/cm^3 , sa rezultatima modela koji koristi kosinusni fit iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018), a Slike 36-39. poređenja vremenske evolucije koncentracija.



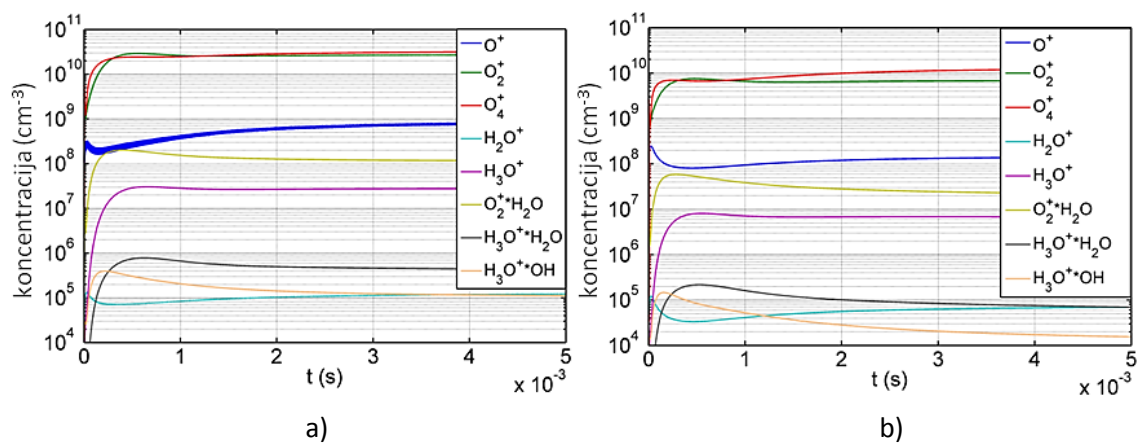
Slika 35. Poređenje hemijskog sastava plazme izračunatog na osnovu 0D globalnog modela sa kosinusnim fitom za $T_e(t)$ iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) i hemijskog sastava sa proračunom temperature elektrona.



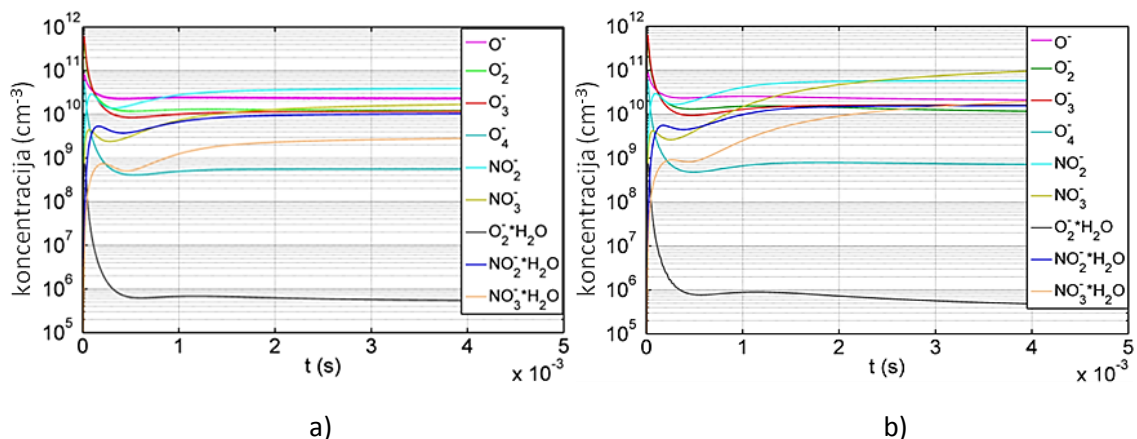
Slika 36. Poređenje vremenske evolucije koncentracija za He^* , He_2^* , He^+ , He_2^+ na osnovu modela sa kosinusnim fitom za $T_e(t)$ a) i modela sa proračunom temperature elektrona b).



Slika 37. Poređenje vremenske evolucije koncentracija za neke važnije reaktivne azotne i kiseonične vrste na osnovu modela sa kosinusnim fitom za $T_e(t)$ a,c) i modela sa proračunom temperature elektrona b,d).

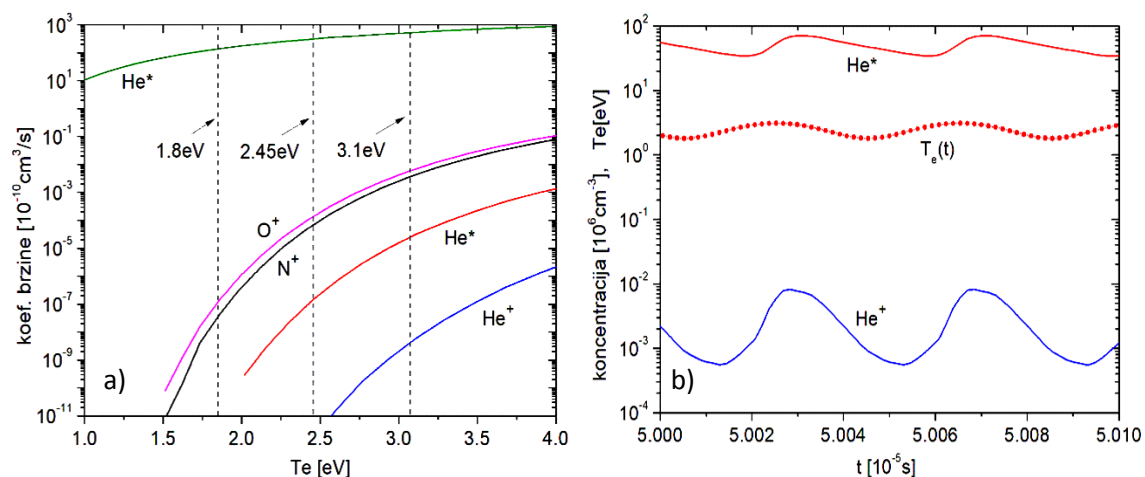


Slika 38. Poređenje vremenske evolucije koncentracija za pozitivne jone kiseonika, H_2O^+ , H_3O^+ i njihove klasterne na osnovu modela sa kosinusnim fitom za $T_e(t)$ a) i modela sa proračunom temperature elektrona b).



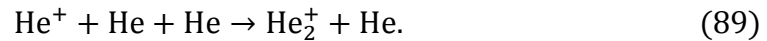
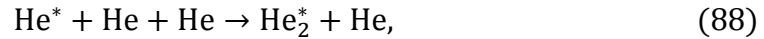
Slika 39. Poređenje vremenske evolucije koncentracija za negativne jone kiseonika, NO_x i njihove klasterne sa vodenom parom, na osnovu modela sa kosinusnim fitom za $T_e(t)$ a) i modela sa proračunom temperature elektrona b).

Kao što se može videti na Slikama 35-39), najizraženije razlike u odnosu na rezultate iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) u slučaju proračuna $T_e(t)$ javljaju se kod vrsta u čijoj kinetici bitnu ulogu igraju elektronski sudarni procesi sa koeficijentima brzine koji složeno zavise od srednje energije elektrona (Slika 40a). To takođe predstavlja uzrok oscilovanja vrednosti koncentracija na Slikama 36a), 37a) i 38a) koje prati kosinusni fit $T_e(t)$, kao što prikazano na Slici 40b) za jon i metastabil helijuma.



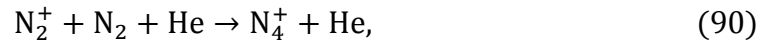
Slika 40. BE koeficijenti brzine za jonizaciju He, He^* , O, N i ekscitaciju He a) i promena koncentracije He^* i He^+ u vremenu usled promene temperature elektrona b).

Na osnovu rezultata iz (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018), prezentovanih na Slici 29, proces ekscitacije atoma helijuma elektronskim udarom nosi 100% udela u ukupnoj produkciji metastabila He^* bez obzira da li se u proračunu koriste MB ili BE koeficijenti brzine. Obzirom na visok prag ovog procesa (19,8eV) vrednost koeficijenta brzine se u intervalu energije elektrona 1,8eV – 3,1eV menja za 5 – 6 redova veličine tokom 4 vremenska koraka u simulaciji (Slika 40a). Ove promene indirektno utiču na koncentraciju jona helijuma preko jonizacije metastabila elektronskim udarom, koji predstavlja dominantni proces proizvodnje He^+ jona ($\cong 100\%$) u BE slučaju (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Obzirom na znatno niži prag (4,78eV) vrednost koeficijenta brzine ovog procesa se u intervalu energije 1,8eV – 3,1eV menja znatno manje, za oko red veličine (Slika 40a). U skladu sa tim, periodična promena koncentracije jona He^+ tokom vremena u proračunu na osnovu kosinusnog fita za $T_e(t)$ predstavlja kumulativni efekat koji uključuje promenu u prinosima za proces ekscitacije $\text{He} + e^- \rightarrow \text{He}^* + e^-$ i jonizacije $\text{He}^* + e^- \rightarrow \text{He}^+ + 2e^-$. Promene u koncentracijama dimera He_2^* i He_2^+ su zatim uslovljene procesima konverzije metastabila i jona:



Brze promene u koncentraciji jona N^+ i O^+ (Slika 37a i 38a) su takođe delom posledica promene u koncentraciji He^* kroz Peningovu jonizaciju i delom zbog promena u prinosu za procese jonizacije elektronskim udarom, čiji su koeficijenti brzine takođe prikazani na Slici 40a). U slučaju jona O^+ promene su manje izražene zato što u proizvodnji bitno učestvuju i procesi jonizacije iz pobuđenih stanja $\text{O}(^1\text{S})$ i $\text{O}(^1\text{D})$ sa nižim pragom.

U slučaju proračuna temperature elektrona ($\cong 2,45\text{eV}$) koncentracije metastabila He^* , He_2^* i jona He^+ i He_2^+ su manje za jedan do dva reda veličine, prevashodno zbog nižeg prinosa ekscitacije helijuma. Takođe, koncentracije čestica ne osciluju tokom vremena (Slika 36b, 37b,d, 38b, 39b). Pored toga, može se primetiti da u slučaju proračuna temperature koncentracija jona N_4^+ značajno raste usled porasta koncentracije jona N_2^+ i veoma izraženog procesa produkcije zbog visoke koncentracije helijuma:



Veća vrednost koncentracije N_2^+ jona je posledica nižeg prinosa za proces:



zbog niže koncentracije atoma O (Slika 37d), odnosno manjeg prinosa za disocijaciju molekula O₂.

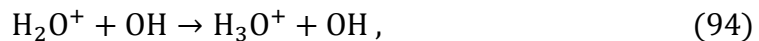
Iz istog razloga pri proračunu temperature elektrona dolazi do smanjenja koncentracije ozona zbog nižeg prinosa za proces proizvodnje:



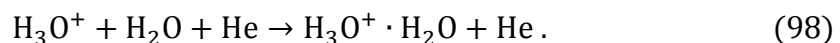
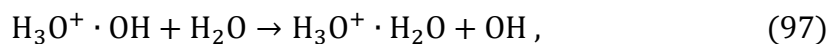
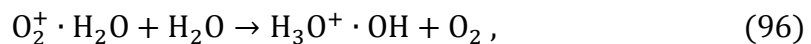
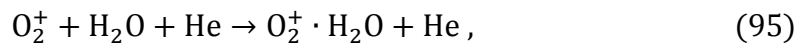
i takođe do povećanja koncentracije OH radikala zbog nižeg prinosa za proces gašenja (Slika 37d):



Na osnovu Slika 38a,b) može se zaključiti da pri proračunu temperature elektrona dolazi do smanjenja koncentracije jona O₂⁺ i H₂O⁺, prevashodno zbog nižih prinosa za jonizacije molekula O₂ i H₂O. To se odražava i na prinos procesa u kojima nastaju joni H₃O⁺:



i odgovarajući klasteri:



Na osnovu Slika 39a,b) može se zaključiti da pri proračunu temperature elektrona dolazi do povećanja koncentracije negativnih jona kiseonika i NO_x, kao posledica nižih prinosa procesa rekombinacije sa pozitivnim jonima. Izuzetak je klaster O₂⁻ · H₂O, kod kojeg dolazi do blagog smanjenja koncentracije zbog promene u prinosu tročestičnog zahvata elektrona na molekulu O₂ sa temperaturom elektrona, u kojem nastaju joni O₂⁻.

8. POREĐENJE REZULTATA GLOBALNOG MODELA SA REZULTATIMA FLUIDNOG MODELA ZA IMPULSNI DC PLAZMA MLAŽ

Jednu od najvažnijih reaktivnih vrsta za primene LTP na atmosferskom pritisku u biomedicini predstavlja OH radikal (Graves et al., 2012; Bruggeman, Schram, 2010). U cilju optimizacije postojećih primena i otvaranja mogućnosti za nove, određivanje glavnih kanala za nastanak i gašenje OH radikala kao i optimalnih vrednosti parametara plazmi koje sadrže veliki udeo vodene pare, u prošloj deceniji bilo je predmet od posebnog značaja na polju izučavanja LTP. Koncentracija OH i glavni procesi koji određuju njegovu hemijsku kinetiku mogu biti određeni merenjem (Bruggeman, Cunge, Sadeghi, 2012; Yonemori et al., 2012; Verreycken, Bruggeman, 2014) i pomoću globalnih (Liu, Bruggeman, Iza, Rong, Kong, 2010; Stalder, Vidmar, Nersisyan, Graham, 2006; Sakyama, Graves, Chang, Shimizu, Morfill, 2012) ili 1D/2D fluidnih modela (Niemi et al., 2011; Liu, Pei, Ostrikov, Lu, Liu, 2014; Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016; Qian, Li, Liu, Zhang, Li, Lin, Wang, 2017). Rezultati 2D fluidnog modela za pulsni DC plazma mlaz u He, koji uključuje 21 vrstu i 71 reakciju, u radu (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016) prezentuju analizu uticaja vodene pare na glavne procese proizvodnje i gašenja OH radikala, za 1%, 0,1% i 0,01% H₂O u smeši. Takođe, u modelu je izvršen proračun koncentracije i temperature elektrona u različitim tačkama sistema, kao i prostorna raspodela električnog polja. Ova studija je dalje proširena u (Qian, Li, Liu, Zhang, Li, Lin, Wang, 2017) na ispitivanje uticaja vremena porasta naponskog pulsa na karakteristike pražnjenja i sastav plazme, sa akcentom na koncentraciju vrsta O i OH.

Kompleksni hemijski sastav i veliki broj fizičkih i hemijskih procesa koji se razvijaju u LTP na atmosferskom pritisku efikasnije se može pratiti pomoću globalnih modela. U radovima (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a; Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2014) analiziran je uticaj vlažnosti vazduha na hemiju RONS za slučaj RF mikro-mlaza u smeši He + 0,5% O₂ kao osnovnim gasom.

U ovom odeljku prezentovani su rezultati 0D globalnog modela iz rada (Gocić, Mladenović, 2018) koji uključuje 68 vrsta i 1425 reakcija preuzetih iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a,b; Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2014), primenjen za proračun koncentracije OH radikala i analizu glavnih

fizičkih i hemijskih procesa koji određuju njegovu kinetiku, za slučaj impulsnog DC plazma mlaza u smeši He/vlažni vazduh iz rada (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016). Proračun je vršen za različite tačke sistema, pri čemu su vrednosti koncentracije i temperature elektrona, određene u fluidnom modelu, korišćene kao ulazni parametri za globalni model. Takođe, rezultati globalnog modela su poređeni sa rezultatima 2D fluidnog modela uz analizu uticaja različitih parametara na koncentraciju i procese proizvodnje i gašenja OH. Kao parametri odabrani su udeo vazduha i vodene pare u smeši, elektronska koncentracija i temperatura. Takođe, proračun je izvršen sa MB i BE koeficijentima brzine za procese iz Tabele 2 kako bi se testirao uticaj neravnotežne EEDF na koncentraciju OH. Pokazano je da globalni model, sa detaljnijom kinetikom u odnosu na fluidni, uspešno predviđa glavne procese proizvodnje i gašenja OH, dok se vrednost koncentracije OH bolje slaže sa rezultatom fluidnog modela ukoliko se proračun vrši sa BE koeficijentima brzine i ukoliko se vrednosti ulaznih parametara korektno odrede na osnovu fluidnog modela (Gocić, Mladenović, 2018). Analogna procedura poređenja rezultata globalnog i fluidnog modela izvršena je za slučaj strimernog DBD pražnjenja (Levko, Raja, 2017) i RF plazme na atmosferskom pritisku (Niemi, Gans, O'Connell, 2013).

8.1 Globalni model i procena ulaznih parametara iz fluidnog modela

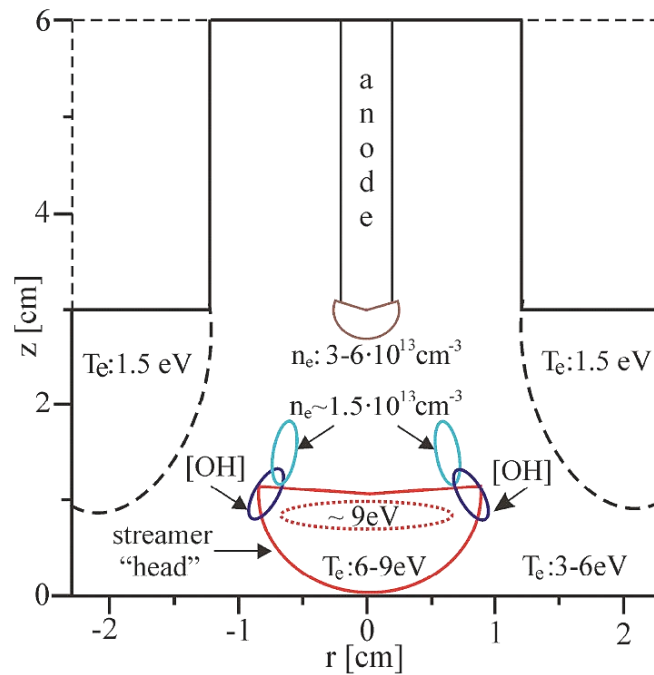
Globalni model uključuje 68 vrsta, svrstanih u Tabeli 10, međusobno povezanih sa 1425 fizičkih i hemijskih procesa preuzetih iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a,b; Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2014). Sistem balansnih jednačina (85) rešavan je primenom MATLAB ODE15s solvera za "stiff" sisteme diferencijalnih jednačina, sa vremenom trajanja pulsa 30ns, vremenskim korakom 0,3ns, relativnom i apsolutnom tolerancijom 10^{-12} i 10^{-6} . Numerička procedura je testirana i primenom ODE45 solvera za rešavanje "non-stiff" sistema i dobijeno je dobro slaganje sa rezultatima ODE15s solvera. Kao osnovni gas je uzet čist He dok su procenat vazduha i vodene pare varirani na osnovu (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016).

Tabela 10. Komponente plazme uključene u globalni model iz rada (Gocić, Mladenović, 2018).

Neutrali	Osnovni neutrali	He, O ₂ , N ₂ , H ₂ O
	Reaktivni neutrali	He [*] , He ₂ [*] , O, O(¹ D), O(¹ S), O ₂ (v=1), O ₂ (v=2), O ₂ (v=3), O ₂ (v=4), O ₂ (¹ Δ), O ₂ (¹ Σ), O ₃ , N, N(² D), N(² P), N ₂ (v=1), N ₂ (v=2), N ₂ (v=3), N ₂ (v=4), CO ₂ , CO ₃ , CO ₄ , N ₂ O, NO, NO ₂ , NO ₃ . H, OH, HO ₂ , H ₂ O ₂ , H ₂ , HNO, HNO ₂ , HNO ₃
Ions	Pozitivni joni	He ⁺ , He ₂ ⁺ , O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ₄ ⁺ , N ⁺ , N ₂ ⁺ , N ₄ ⁺ , NO ⁺ , NO ₂ ⁺ , N ₂ O ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₃ O ⁺
	Klasteri poz. jona	O ₂ ⁺ · H ₂ O, H ₃ O ⁺ · H ₂ O, H ₃ O ⁺ · OH
	Negativni joni	O ⁻ , O ₂ ⁻ , O ₃ ⁻ , O ₄ ⁻ , NO ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻ , CO ₄ ⁻
	Klasteri neg. jona	O ₂ ⁻ · H ₂ O, NO ₂ ⁻ · H ₂ O, NO ₃ ⁻ · H ₂ O, CO ₃ ⁻ · H ₂ O, CO ₄ ⁻ · H ₂ O

Na Slici 41. prikazana je šema DC plazma mlaza za prostornom raspodelom vrednosti parametara plazme, kao i naznačenim oblastima sa maksimalnom vrednosti koncentracije OH radikala (ljubičaste linije). Anoda je u obliku šiljka dok je druga elektroda uzemljena i nalazi se iza izolatorske površi od kvarca. Nakon primene pozitivnog naponskog impulsa zona pražnjenja se od vrha anode širi 2,3mm u radijalnom i 3mm u aksijalnom pravcu, pri čemu se region sa maksimalnom produkcijom OH radikala delom preklapa sa regionom u kojem je koncentracija elektrona na osnovu fluidnog modela $1,5 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ a vrednost temperature elektrona od 6eV do 9eV (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016). Imajući u vidu brz razvoj i izrazitu prostornu nehomogenost pražnjenja, proračun globalnim modelom je vršen za širi interval koncentracije $n_e = (1 - 6) \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ i temperature $T_e = (1,5 - 9) \text{eV}$ (Gocić, Mladenović, 2018). Obzirom da se pražnjenje širi u zoni koja sadrži vlažni vazduh, procenat vazduha predstavlja veoma važan parametar za modelovanje. Na osnovu prostorne raspodele udela vazduha pri protoku 1slm, prezentovanom u (Qian,

Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016), za oblast sa maksimalnom proizvodnjom OH može se kao maksimalna vrednost udela vazduha uzeti vrednost od 5%. Međutim, rezultati fluidnog modela iz rada (Liu et al., 2018) pokazuju da udeo vazduha u helijumu veći od 0,5% usporava razvoj i napredovanje strimera usled snižavanja maksimalne vrednosti temperature elektrona. U skladu sa tim, u globalnom modelu je kao maksimalna vrednost udela vazduha uzet 1% (Gocić, Mladenović, 2018). Proračun je vršen za tri vrednosti procenta vodene pare u odnosu na vazduh 1% H₂O, 0,1% H₂O i 0,01% H₂O, dok su procenti N₂ i O₂ bili (78%, 21%), (78,8%, 21,1%) i (78,88%, 21,11%). Na osnovu rezultata iz (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016) ovim procentima vodene pare odgovara maksimalna koncentracija OH radikala od $6,3 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-3}$, $7,0 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-3}$ i $7,0 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$, respektivno.



Slika 41. Vrednosti elektronske koncentracije i temperature u različitim tačkama sistema, kao ulazni parametri za 0D globalni model (Gocić, Mladenović, 2018).

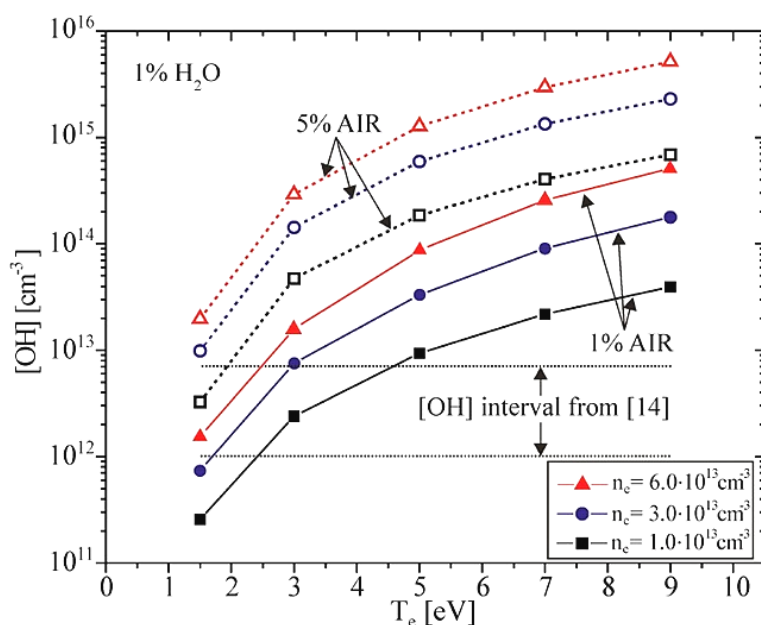
8.2 Uticaj udela vazduha, koncentracije i temperature elektrona na koncentraciju OH radikala

Na Slici 42. prikazano je poređenje rezultata globalnog modela za udele vazduha 1% i 5% pri 1% vodene pare, sa intervalom vrednosti koncentracije OH na osnovu fluidnog modela za isti procenat vodene pare iz (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016). Za oba udela vazduha proračun koncentracije OH izvršen je za tri vrednosti koncentracije elektrona $1,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $3,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $6,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Koncentracija OH izračunata na osnovu globalnog modela za 5% vazduha je veća okvirno za jedan do tri reda veličine u odnosu na maksimalnu vrednost određenu fluidnim modelom, dok za 1% vazduha postoji bolje slaganje rezultata globalnog i fluidnog modela, posebno na nižim srednjim energijama 2-3eV. Na većim energijama rezultati globalnog modela su i dalje iznad intervala koncentracije OH određenim fluidnim modelom. Razlike u rezultatima globalnog i fluidnog modela mogu biti očekivane pri modelovanju pražnjenja koja imaju brz prostorni i vremenski razvoj kao i izrazitu prostornu nehomogenost. Napredovanje strimera je povezano sa brzim razvojem jonizacionog fronta usled jakog gradijenta električnog polja koje ubrzava elektrone do srednjih energija 9eV.

Korišćenje koeficijenata brzine za elektronske sudarne procese iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013b) u Arenijusovoj formi koja predstavlja fit na nižim srednjim energijama takođe može biti uzrok navedena odstupanja. Takođe, globalni model je prostorno usrednjen i proračun koncentracija komponenata plazme je vršen za konstantne koncentracije elektrona i srednje energije, bez uključivanja difuzionih gubitaka i gubitaka na zidovima (Gocić, Mladenović, 2018).

Obzirom da veći udeo vazduha ima za posledicu povećanje koncentracije OH, može se zaključiti da bi se bolje slaganje između rezultata različitih modela moglo postići sa manjim udelom vazduha, npr. 0,5% na osnovu (Liu et al., 2018), kao i proračunom vremenskog razvoja koncentracije i temperature elektrona. Međutim, to bi u slučaju modelovanja impulsnih i strimernih pražnjenja zahtevalo veliku dinamiku do deset redova veličine u balansnim jednačinama za vremenski razvoj, zato što neki od hemijskih procesa imaju karakteristične vremenske konstante reda milisekundi. Sa druge strane, rezultati globalnog modela mogu ukazati na uzajamnu povezanost

određenih parametara plazme i time na određene fizičke i hemijske procese od značaja, obzirom da pružaju mogućnost za detaljno praćenje hemijske kinetike svake od komponenata plazme. Činjenica da vrednost koncentracije OH raste pri većim koncentracijama elektrona za istu srednju energiju, kao i to da raste sa srednjom energijom za istu vrednost koncentracije elektrona (Slika 42), ukazuje na to da u kinetici OH bitnu ulogu igraju elektronski sudarni procesi. Glavni kanali za nastanak i gašenje OH radikala u modelu (Gocić, Mladenović, 2018) biće prezentovani u Odeljku 8.4.

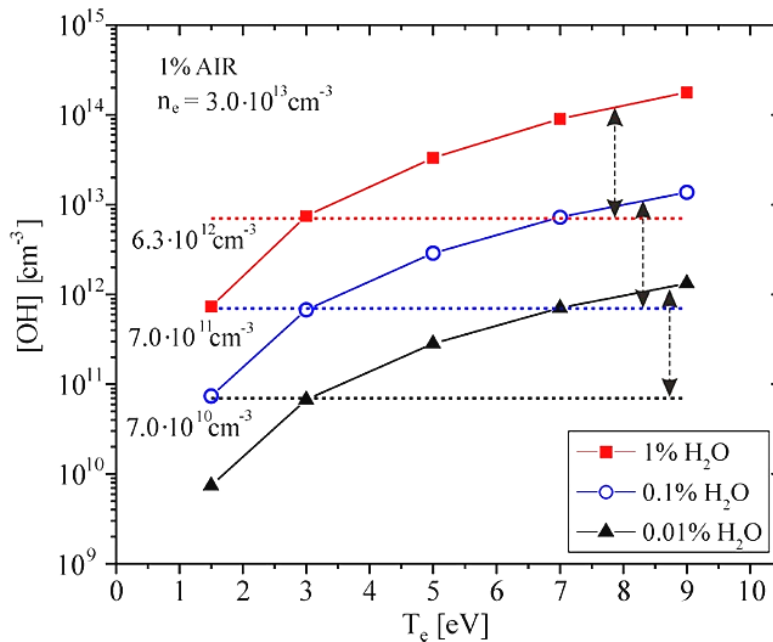


Slika 42. Koncentracija OH u funkciji srednje energije elektrona, na osnovu globalnog modela iz (Gocić, Mladenović, 2018), za 1% vodene pare i 1% i 5% vazduha. Interval vrednosti OH za 1% H₂O iz (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016).

8.3 Uticaj vodene pare i EEDF na koncentraciju OH radikala

Na Slici 43. prikazana je koncentracija OH radikala u funkciji temperature elektrona, određena na osnovu globalnog modela za 1% vazduha, koncentraciju elektrona $3,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ i tri različita udela vodene pare 1%, 0,1% i 0,01% H₂O (Gocić, Mladenović, 2018). Na Slici 43. su takođe prikazane maksimalne vrednosti koncentracije OH za ove udele vodene pare iz (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016). Na nižim srednjim energijama postoji dobro slaganje rezultata globalnog i

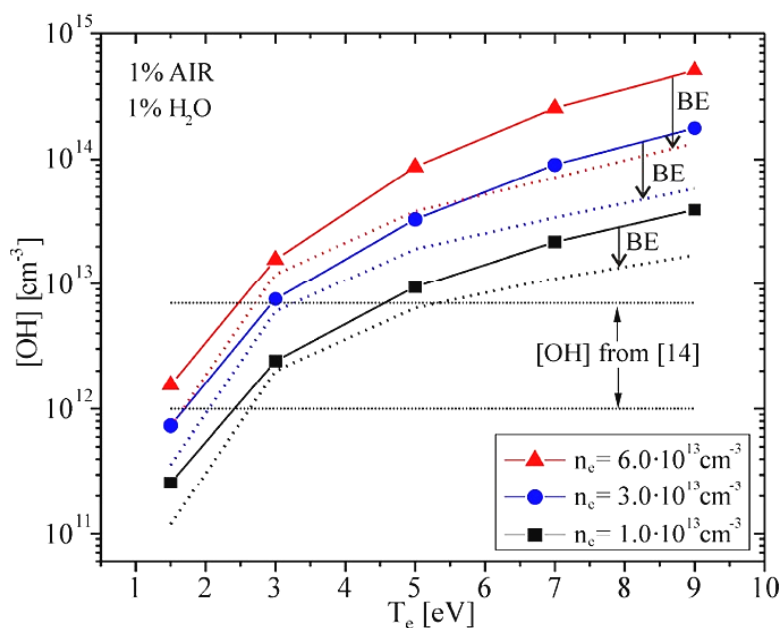
fluidnog modela, posebno za energiju 3eV. Na većim energijama rezultati globalnog modela u sva tri slučaja imaju okvirno za red veličine veću vrednost u odnosu na rezultate fluidnog. Rezultati proračuna za koncentracije elektrona $1,0 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ i $6,0 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ bili bi raspoređeni simetrično ispod i iznad rezultata za srednju vrednost $3,0 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$, što je očekivano na osnovu zavisnosti sa Slike 42. Na osnovu prostorne raspodele n_e i T_e , prikazane na Slici 41, oblasti sa najvećom produkcijom OH radikala odgovaraju veće temperature ali manja vrednost koncentracije elektrona $n_e \leq 1,5 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$. Na većim energijama može se postići bolje slaganje rezultata globalnog i fluidnog modela pogodnijim odabirom vrednosti za n_e .



Slika 43. Koncentracija OH u funkciji temperature elektrona na osnovu globalnog modela (Gocić, Mladenović, 2018) za 1% vazduha i 1%, 0,1% i 0,01% H₂O. Prikazane su maksimalne koncentracije OH iz (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016).

Na rezultate globalnog modela bitno utiče odabir EEDF i koeficijenata brzine (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Na Slici 44. prikazana je koncentracija OH radikala u funkciji temperature elektrona za 1% vazduha i 1% vodene pare, ali na osnovu BE koeficijenata za procese iz Tabele 2 izračunatih pomoću programa BOLSIG+ iz baze preseka Morgan LXCat (Gocić, Mladenović, 2018). Rezultati na osnovu BE proračuna se na svim srednjim energijama bolje slažu sa rezultatima

fluidnog modela, pri čemu se najveća odstupanja u odnosu na proračun sa MB koeficijentima javljaju na većim srednjim energijama. Niža koncentracija OH radikala u proračunu sa BE koeficijentima brzine je prevashodno posledica nižeg prinosa za proces proizvodnje $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_3\text{O}^+$, odnosno smanjene proizvodnje jona H_2O^+ u jonizaciji molekula H_2O elektronskim udarom (Gocić, Mladenović, 2018).



Slika 44. Uticaj neravnotežne EEDF na rezultate globalnog modela (tačkaste linije) za 1% vazduha, 1% H_2O i različite koncentracije elektrona (Gocić, Mladenović, 2018).

8.4 Uticaj temperature elektrona na procese proizvodnje i potrošnje OH radikala

Jedna od glavnih prednosti globalnog modela u odnosu na kinetičke leži u mogućnosti za uključjenje velikog broja reakcija u proračun, usled čega se mogu detaljnije odrediti glavni procesi koji određuju kinetiku svake od uključenih vrsta čestica. U Tabeli 11. svrstani su pet najvažnijih procesa proizvodnje (R1-R5) i potrošnje (R6-R10) OH radikala na osnovu globalnog modela iz rada (Gocić, Mladenović, 2018) za konstantnu koncentraciju elektrona $n_e = 6,0 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ i temperaturu $T_e = 1,5 - 9 \text{eV}$. U literaturi se kao važan proces nastanka OH navodi disocijacija H_2O elektronskim udarom za udeo vodene pare reda nekoliko hiljada ppm (Bruggeman,

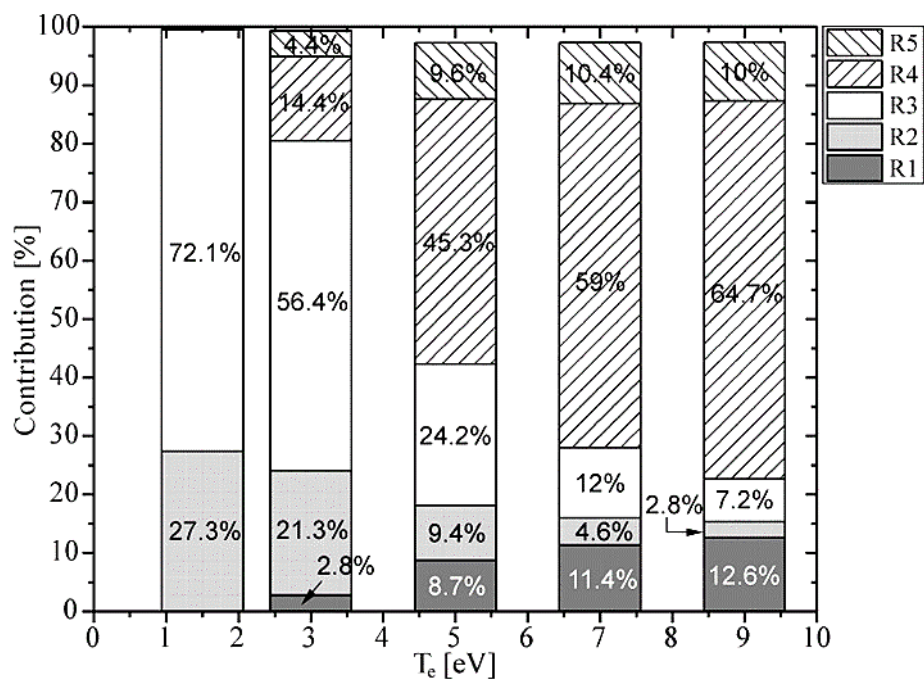
Schram, 2010), međutim prinos ovog procesa linearno zavisi od koncentracije vodene pare usled čega je za 100ppm H₂O nekoliko redova veličine manji u odnosu na prinos nelinearnog procesa H₂O⁺ + H₂O → OH + H₃O⁺. Takođe, procesi R2-R4, koji su prepoznati kao bitni za produkciju OH u fluidnom modelu iz (Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016), imaju veći prinos u odnosu na disocijaciju H₂O zbog toga što je koncentracija pobuđenih stanja O(¹S) i O(¹D) za red veličine veća od koncentracije elektrona (~10¹⁴cm⁻³). Na Slikama 45. i 46. prikazani su procentualni doprinosi procesa proizvodnje (R1-R5) i potrošnje (R6-R10) OH radikala u funkciji temperature elektrona.

Tabela 11. Najvažniji procesi proizvodnje i potrošnje OH radikala sa koeficijentima brzine (cm³/s), (Gocić, Mladenović, 2018).

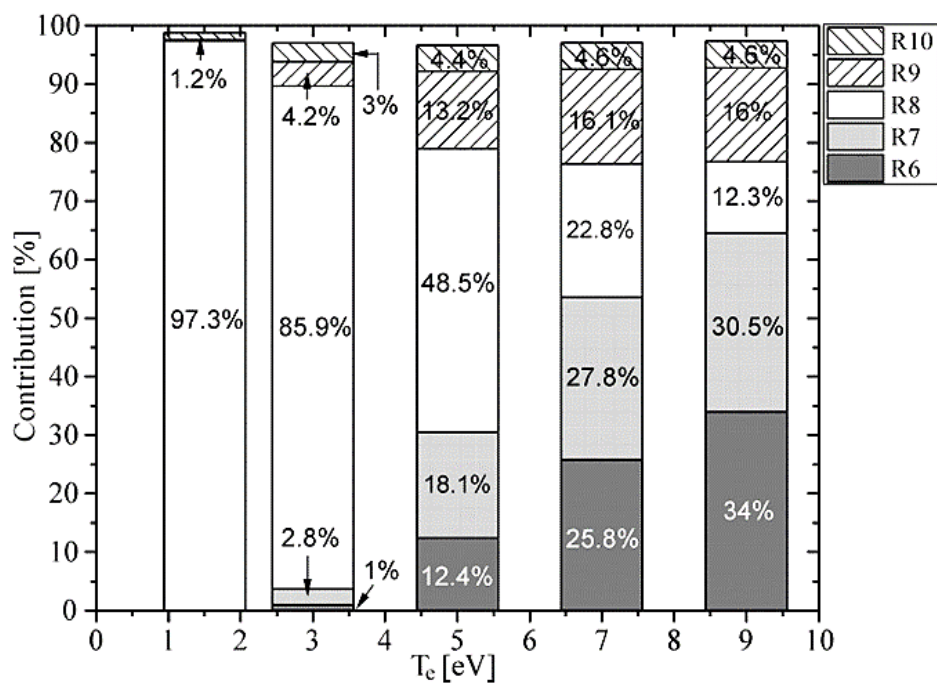
R1	H ₂ O ⁺ + H ₂ O → OH + H ₃ O ⁺	1.8·10 ⁻⁹
R2	O(¹ D) + H ₂ O → OH + OH	1.62·10 ⁻¹⁰ exp(64.95/T _g)
R3	O(¹ S) + H ₂ O → OH + OH	5.0·10 ⁻¹⁰
R4	e+H ₂ O ⁺ → H + OH	3.8·10 ⁻⁷
R5	e+H ₃ O ⁺ → H + H + OH	5.46·10 ⁻⁶ ·T _e ^{-0.5}
R6	He ⁺ + OH → He + H + O ⁺	1.1·10 ⁻⁹
R7	N ⁺ + OH → H + NO ⁺	3.4·10 ⁻¹⁰
R8	e ⁻ + OH → e ⁻ + O + H	2.08·10 ⁻⁷ T _e ^{-0.76} exp(-6.9/T _e)
R9	N + OH → NO + H	3.29·10 ⁻¹¹ exp(72.3/T _g)
R10	O + OH → O ₂ + H	2.2·10 ⁻¹¹ exp(120/T _g)

Na nižim energijama proizvodnja OH je prevashodno određena disocijacijom H₂O u sudaru sa O(¹S) i O(¹D), dok na višim energijama ulogu dominantnog procesa preuzima rekombinacija R4 zbog značajno veće produkcije H₂O⁺ i konstantne vrednosti koeficijenta brzine na svim srednjim energijama (Gocić, Mladenović, 2018). Inicijalno H₂O⁺ joni nastaju u procesu jonizacije elektronskim udarom i Peningove jonizacije sa He^{*}, nakon čega se javljaju i procesi prenosa naelektrisanja sa jonima N⁺, N₂⁺ i N₄⁺.

Na nižim energijama dominantni proces potrošnje OH radikala predstavlja disocijacija OH elektronskim udarom. Procesi R6-R7 imaju većinski doprinos u potrošnji OH iznad 7eV usled znatno pojačane produkcije jona He⁺ i N⁺. Ovi procesi su takođe navedeni kao bitni za kinetiku OH radikala u (Verreycken, Bruggeman, 2014). Procesi R9-R10, koji su prepoznati kao bitni za gašenje OH u (Bruggeman, Schram, 2010), u modelu iz rada (Gocić, Mladenović, 2018) imaju procentualni doprinos oko 20% u potrošnji OH.



Slika 45. Procentualni doprinosi glavnih kanala u proizvodnji OH radikala R1-R5 u funkciji temperature elektrona za koncentraciju elektrona $n_e = 6,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (Gocić, Mladenović, 2018).

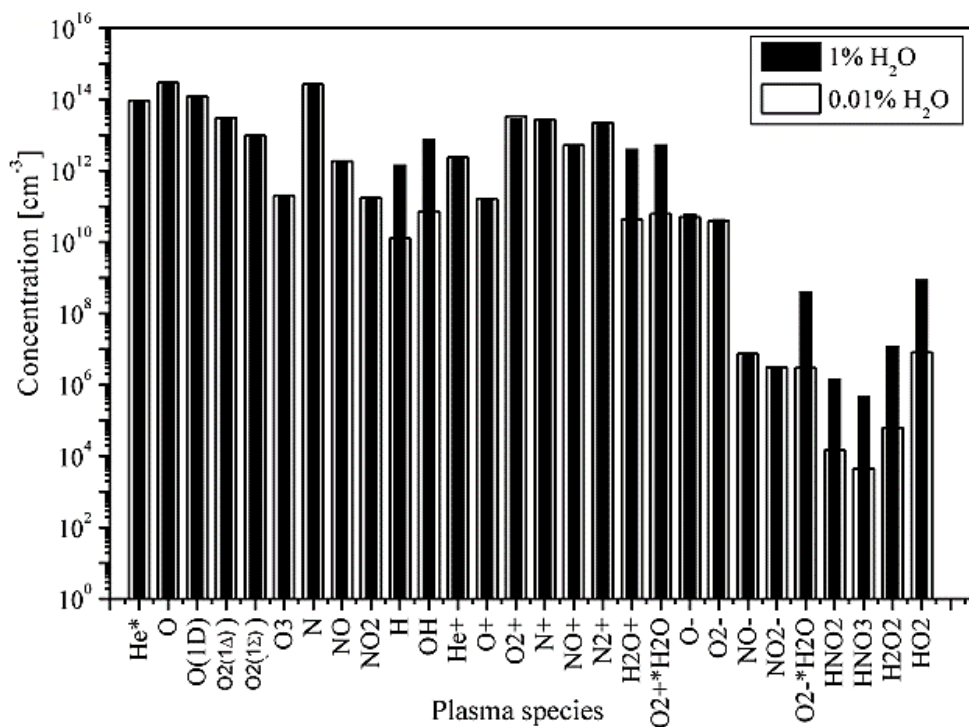


Slika 46. Procentualni doprinosi glavnih kanala u potrošnji OH radikala R6-R10 u funkciji temperature elektrona za koncentraciju elektrona $n_e = 6,0 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (Gocić, Mladenović, 2018).

U literaturi se kao bitan proces potrošnje OH navodi i tročestični proces $H + OH + M \rightarrow H_2O + M$ (Bruggeman, Schram, 2010; Liu, Pei, Ostrikov, Lu, Liu, 2014; Qian, Yang, Wang, Chen, Liu, Wang, 2016). Međutim, u modelu (Gocić, Mladenović, 2018) doprinos ovog procesa u potrošnji OH je približno dva reda veličine manji u odnosu na doprinose procesa R6-R8 zbog pojačane produkcije jona He^+ i N^+ na većim srednjim energijama.

8.5 Uticaj vodene pare na hemijski sastav plazme i glavni kanali za RONS

Na Slici 47. prikazane su koncentracije nekih važnijih RONS u plazmi He+1% vazduha nakon 30ns, za 1% i 0,01% vodene pare (Gocić, Mladenović, 2018).

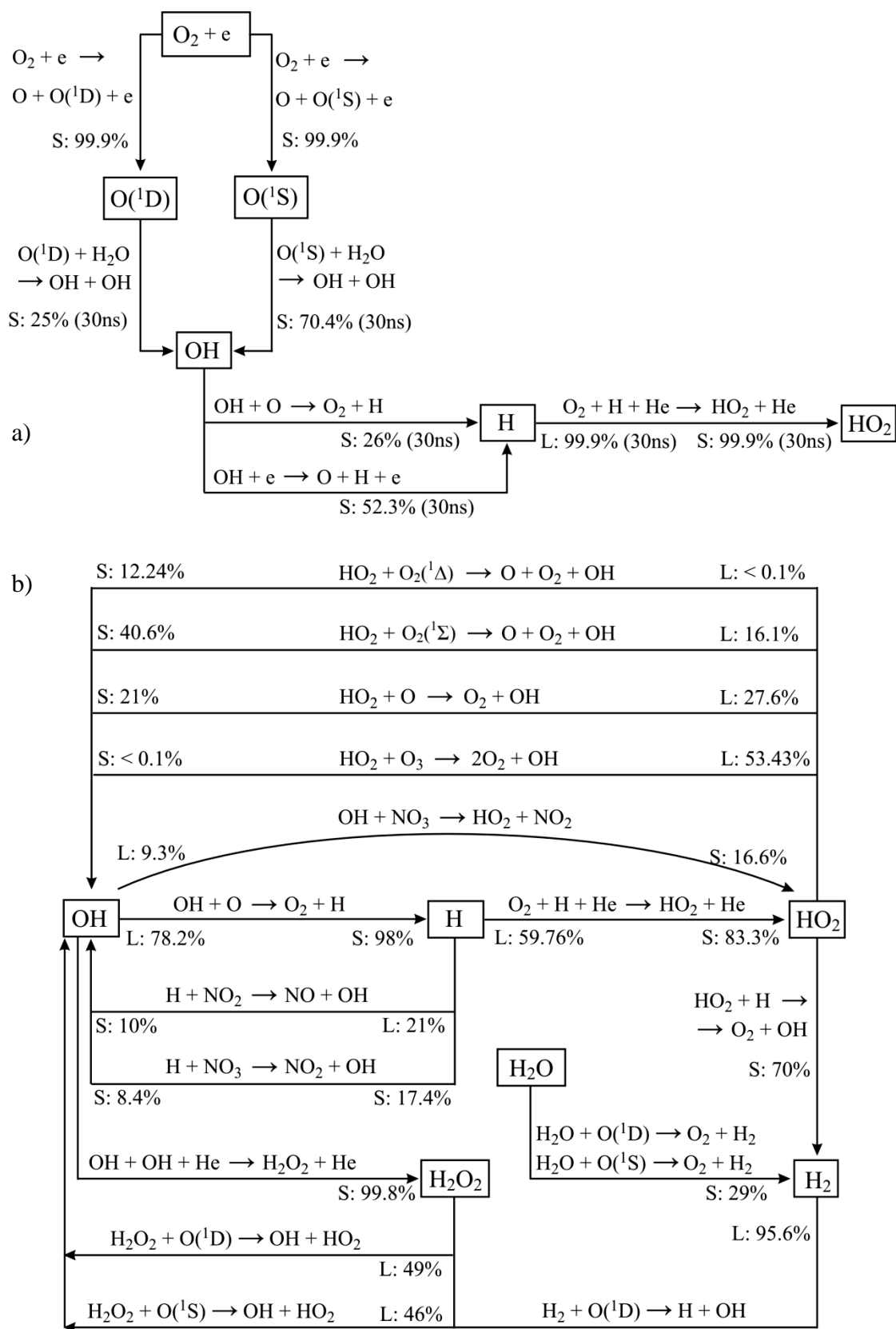


Slika 47. Hemijski sastav plazme na osnovu globalnog modela za 1% vazduha, 1% i 0,01% vodene pare (Gocić, Mladenović, 2018).

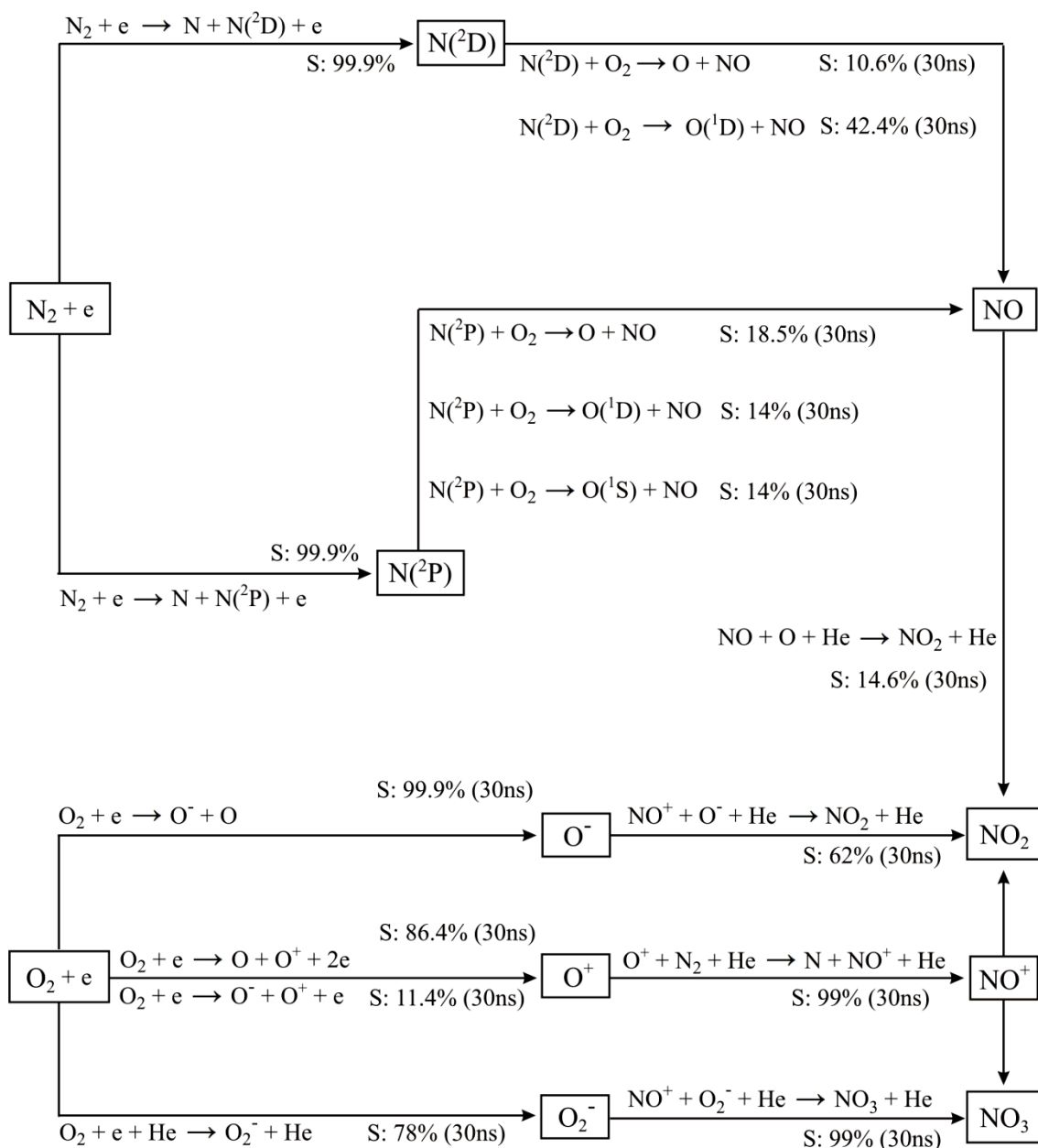
Najizraženije razlike u hemijskom sastavu plazme za 1% i 0,01% H₂O javljaju se kod vrsta na čiju kinetiku dominantno utiče vodena para, H, OH, H₂O⁺, O₂⁺·H₂O i

$O_2^- \cdot H_2O$. Pored toga, vodena para ima indirektni uticaj na vrste H_2 , HO_2 , H_2O_2 , HNO_2 i HNO_3 , prevashodno preko hemijskih procesa u kojima učestvuju H i OH. Šeme glavnih procesa nastanka (S) i gašenja (L) najvažnijih RONS, za 1% vazduha i 0,01% vodene pare, koncentraciju elektrona $n_e = 6,0 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ i temperaturu $T_e = 3\text{eV}$, nakon 30ns prikazane su na Slikama 48a) i 49. Jedna od prednosti globalnog modela u odnosu na fluidne i PIC-MCC ogleđa se u brzom proračunu sastava plazme, apsolutnih prinosa i procentualnih doprinosa u proizvodnji i gašenju odgovarajućih čestica za sve uključene procese. U skladu sa tim, kao dodatak modelu iz (Gocić, Mladenović, 2018) na Slici 48b) i Slici 50. prikazani su rezultati za duže vreme simulacije od 5ms, odnosno izvršena je analiza potencijalno bitnih procesa koji se mogu razviti u drugim tipovima niskotemperaturnih plazmi (RF, kHz...). Pri tom u kraćim intervalima reda mikrosekundi ili čak nanosekundi dolaze inicijalno do izražaja primarni procesi poput ekscitacija, disocijacija i jonizacija elektronskim udarom. U okviru dužih vremenskih intervala sa povećanjem kompleksnosti hemijskog sastava plazme mogu postati znalajni i sekundarni procesi poput različitih hemijskih reakcija.

Na osnovu Slike 48a) sledi zaključak da pri nižim udelima vodene pare u smeši umesto disocijacije molekula H_2O na proizvodnju OH radikala najznačajniji uticaj imaju pobuđena stanja atoma kiseonika $O(^1S)$ i $O(^1D)$ kroz procese R2 i R3 u Tabeli 11, koja inicijalno nastaju u procesima disocijacije molekula O_2 elektronskim udarom. Ekscitacija atoma O ima višestruko niži prinos zbog niže koncentracije atomskog kiseonika u smeši u odnosu na molekulski. Na potrošnju OH radikala dominantno utiče disocijacija elektronskim udarom koja takođe određuje proizvodnju atomskog vodonika, pored procesa (93). U dužim vremenskim intervalima (Slika 48b) dolazi do razvoja većeg broja hemijskih reakcija sa ozonom, oksidima azota i pobuđenim stanjima $O(^1S)$, $O(^1D)$, $O_2(^1\Delta)$ i $O_2(^1\Sigma)$, koje sprežu kinetiku vrsta OH, H, H_2 , HO_2 i H_2O_2 . Proces (93) preuzima glavnu ulogu u potrošnji OH i proizvodnji H. Asocijacijom OH radikala uz atome helijuma nastaje vodonik peroksid, dok atomi vodonika asocijacijom sa molekulima O_2 proizvode HO_2 . Proces gašenja ovih stanja poprimaju značajan doprinos u proizvodnji OH radikala.



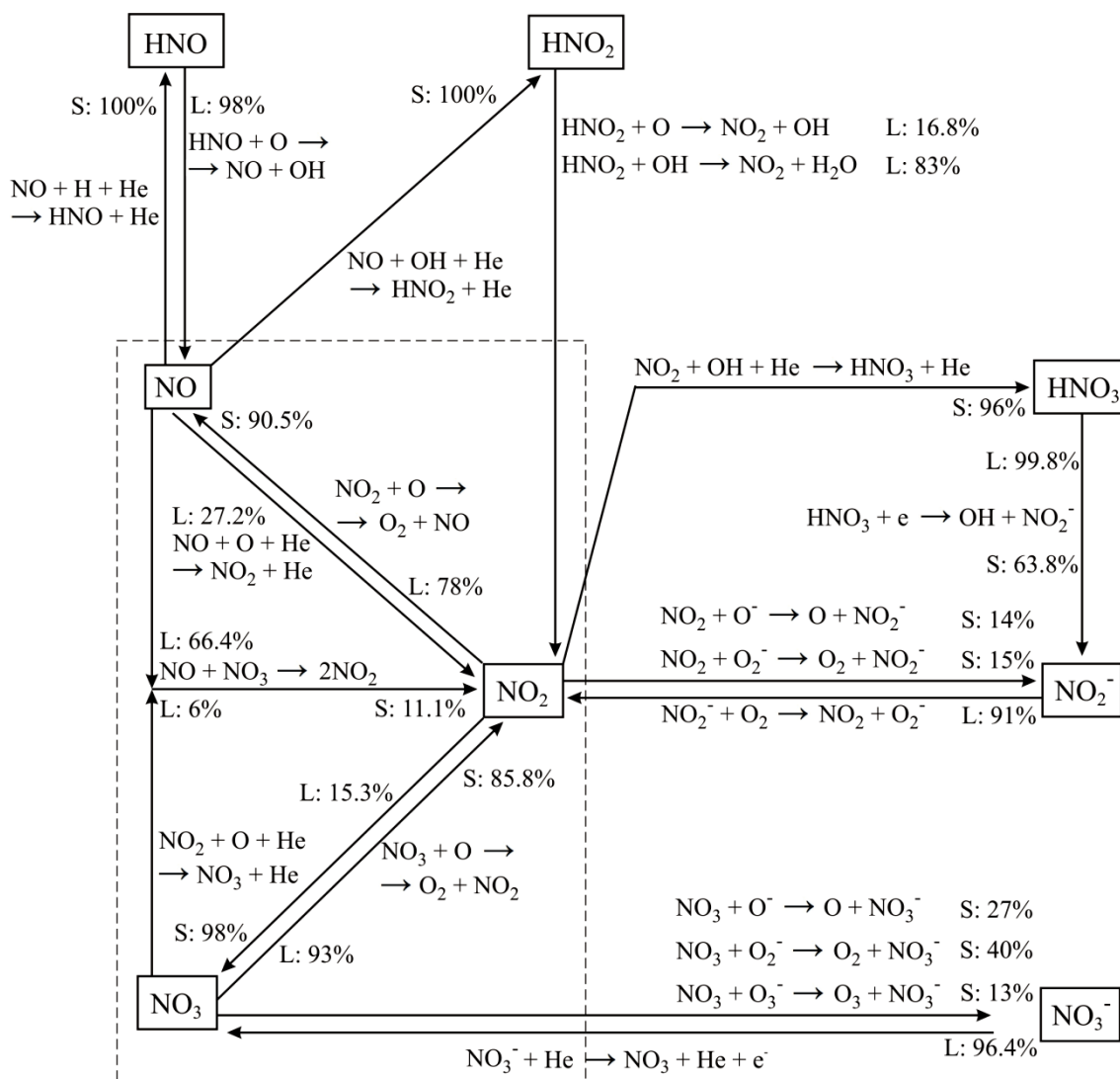
Slika 48. Glavni procesi proizvodnje i potrošnje H, OH, H₂, HO₂ i H₂O₂ za vreme simulacije 30ns a) i 5ms b), 1% vazduha i 0,01% videne pare.



Slika 49. Glavni procesi proizvodnje i potrošnje NO, NO₂ i NO₃ za vreme simulacije 30ns, 1% vazduha i 0,01% vodene pare.

Na osnovu Slike 49. može se zaključiti da NO inicijalno nastaje u reakcijama pobuđenih atoma azota N(²D) i N(²P) sa kiseonikom, koji nastaju disocijacijom molekula N₂ elektronskim udarom. Joni NO⁺ nastaju jonskom konverzijom od jona O⁺, koji pak nastaju disocijativnom jonizacijom molekula O₂ elektronskim udarom. Na proizvodnju jedinjenja NO₂ i NO₃ bitno utiču rekombinacije jona NO⁺ sa jonima O⁻ i

O_2^- , koji inicijalno nastaju disocijativnim i tročestičnim zahvatom elektrona na molekulima O_2 . U dužim vremenskim intervalima (Slika 50) dolaze do izražaja hemijske reakcije sa kiseonikom koje sprežu kinetiku NO , NO_2 i NO_3 , dok u tročestičnim asocijacijama sa atomima H i OH radikalima nastaju azotne kiseline HNO , HNO_2 i HNO_3 .



Slika 50. Glavni procesi proizvodnje i potrošnje NO , NO_2 , NO_3 i HNO_x za vreme simulacije 5ms, 1% vazduha i 0,01% vodene pare.

9. GLOBALNI MODEL SA PRORAČUNOM TEMPERATURE I KONCENTRACIJE ELEKTRONA UZ UKLJUČENJE ZAPREMINSKOG PROTOKA GASA

9.1 Postavka modela - balansne jednačine i hemijski sastav

U ovom odeljku prezentovani su rezultati 0D modela koji uključuje 73 vrste čestica, svrstane u Tabeli 12, povezane sa 1408 fizičkih i hemijskih procesa u Tabeli 13 u Dodatku 1. Model je razvijen na osnovu podataka iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a,b; Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018; Gocić, Mladenović, 2018; van Gaens, Bogaerts, 2013; Liu et al., 2010; Tennyson et al., 2017). Model uključuje proračun temperature i koncentracije elektrona, kao i proračun protoka, pri čemu su koeficijenti brzine za sve elektronske sudarne procese izračunati pomoću programa BOLSIG+ na osnovu baze preseka LXCat i Quantemol-DB (www.lxcat.net; Tennyson et al., 2017). Temperatura T_e [eV] i koncentracija n_e [cm^{-3}] elektrona se nakon svakog vremenskog koraka proračunavaju samousaglašeno sa proračunom koncentracija svih komponenata plazme iz sistema jednačina:

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} = & \sum_j \sum_m k_{jm}^S n_j n_m + \sum_l \sum_p \sum_q k_{lpq}^S n_l n_p n_q - \\ & - n_i \sum_r k_{ir}^L n_r - n_i \sum_s \sum_f k_{isf}^L n_s n_f + \frac{F_i^{fgc}}{V} n_i^{fgc}(t=0) - \frac{F_i}{V} n_i(t), \end{aligned} \quad (99)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_e}{dt} = & \sum_i k_{ei}^{ion} n_e n_i + \sum_j \sum_l k_{jl}^{Pen} n_j^{ex} n_l + \sum_p \sum_q k_{pq}^{det} n_p n_q - \sum_s k_{es}^{2att} n_e n_s - \\ & - \sum_d k_{ed}^{3att} n_e n_{O_2} n_d - \sum_m k_{em}^{2rec} n_e n_m^{ion} - \sum_m \sum_r k_{emr}^{3rec} n_e n_m^{ion} n_r, \end{aligned} \quad (100)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(n_e T_e) = & T_e(t) \frac{dn_e}{dt} + n_e(t) \frac{dT_e}{dt} = \\ = & \frac{2S_{abs}}{3e} - \sum_i k_{ei}^{el} n_e n_i \frac{2m_e}{M_i} (T_e - T_g^e) - \frac{2}{3} \sum_j k_{ej}^{inel} n_e n_j \varepsilon_{ej}^{thr}. \end{aligned} \quad (101)$$

Tabela 12. Komponente plazme uključene u globalni model.

Inicijalne vrste	Helijum	$n_{He} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (760 Torr, 296,4 K, 3 slm)
	Vazduh (10000 ppm)	78% N ₂ , 21% O ₂ , 10 ⁻² % CO ₂ , 10 ⁻³ % N ₂ O, 10 ⁻⁵ % NO ₂ , 10 ⁻⁶ % NO
	Vodena para (20-10000 ppm)	H ₂ O
	elektroni	$n_e(t = 0) = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
Reaktivni neutrali		He [*] , He ₂ [*] , O, O(¹ D), O(¹ S), O ₂ (v=1), O ₂ (v=2), O ₂ (v=3), O ₂ (v=4), O ₂ (¹ Δ), O ₂ (¹ Σ), O ₃ , CO ₃ , CO ₄ , N, N(² D), N(² P), N ₂ (v=1), N ₂ (v=2), N ₂ (v=3), N ₂ (v=4), NO ₃ , H, H ₂ , OH, HO ₂ , H ₂ O ₂ , HNO, HNO ₂ , HNO ₃
Joni	Pozitivni joni	He ⁺ , He ₂ ⁺ , H ₂ ⁺ , O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ₄ ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₃ O ⁺ , N ⁺ , N ₂ ⁺ , N ₃ ⁺ , N ₄ ⁺ , NO ⁺ , NO ₂ ⁺ , N ₂ O ⁺
	Klasteri poz. jona	O ₂ ⁺ · H ₂ O, H ₃ O ⁺ · H ₂ O, H ₃ O ⁺ · OH
	Negativni joni	O ⁻ , O ₂ ⁻ , O ₃ ⁻ , O ₄ ⁻ , H ⁻ , OH ⁻ , NO ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻ , CO ₄ ⁻
	Klasteri neg. jona	O ₂ ⁻ · H ₂ O, NO ₂ ⁻ · H ₂ O, NO ₃ ⁻ · H ₂ O, CO ₃ ⁻ · H ₂ O, CO ₄ ⁻ · H ₂ O

U jednačinama (99)-(101) usvojen je latinski indeks za pojedinačne vrste čestica (komponente plazme), dok se indeks “e” odnosi na elektrone. k_{jm}^S i k_{lpq}^S predstavljaju koeficijente brzine dvočestičnog procesa $j - m$ i tročestičnog procesa $l - p - q$ u kojem nastaje čestica i , k_{ir}^L i k_{isf}^L predstavljaju koeficijente brzine dvočestičnog procesa $i - r$ i tročestičnog procesa $i - s - f$ u kojem nestaje čestica vrste i .

U sistemu jednačina (99) za proračun koncentracija svih teških čestica članovi za proračun protoka usvojeni su po analogiji sa globalnim modelom za LTP u smeši He/H₂O iz rada (Liu, Bruggeman, Iza, Rong, Kong, 2010) koji uključuje 46 vrsta i 577

reakcija. U petom i šestom članu na desnoj strani jednačine (99) $F_i = \Delta V_i / \Delta t$ predstavlja zapreminski protok za čestice vrste i , izražen u jedinici [slm] (engl. standard liter per minute, $1 \text{ m}^3/\text{s} = 60000\text{slm}$) a V karakterističnu zapreminu sistema.. Gornji indeks “ fgc ” označava komponentnu osnovnog gasa (engl. feed gas component), za koje se uračunava pozitivan doprinos protoka, odnosno dotok u reaktor na početku simulacije ($t = 0$). Za sve komponente plazme, uključujući i komponente osnovnog gasa, u balansnim jednačinama (99) uračunava se potrošnja usled protoka $(F_i n_i(t)) / V$ tokom vremena, koja zavisi od njihove koncentracije n_i . Efekti protoka se ne računaju u balansnoj jednačini (100), na osnovu pretpostavke da na koncentraciju elektrona daleko izraženiji uticaj imaju nekonzervativni procesi kao i činjenice da elektroni, zbog mnogo manje mase u odnosu na masu teških čestica ($m_e / M_i \sim 10^{-4} - 10^{-5}$), nisu nosioci zapreminskog/masenog protoka.

Jednačina (100) uključuje prinose za sve nekonzervativne procese u modelu, jonizacije elektronskim udarom, Peningove jonizacije, oslobađanja elektrona od negativnih jona (engl. detachment), disocijativne zahvate, tročestične zahvate za O_2 i konačno dvočestične i tročestične rekombinacije sa jonima, sa odgovarajućim koeficijentima brzine k_{ei}^{ion} , k_{jl}^{Pen} , k_{pq}^{det} , k_{es}^{2att} , k_{ed}^{3att} , k_{em}^{2rec} i k_{emr}^{3rec} .

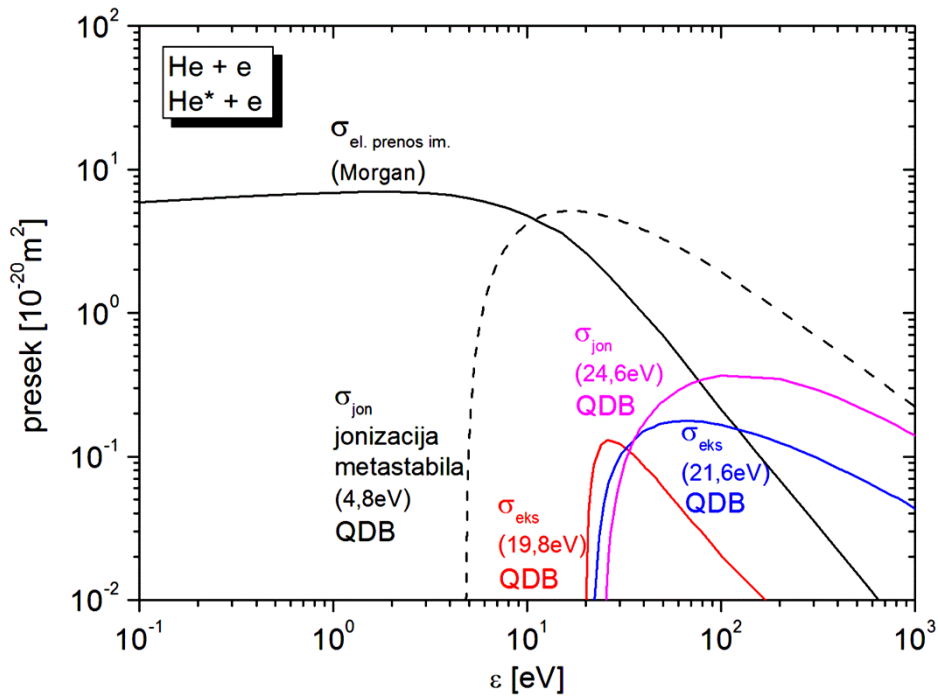
U jednačini (101) S_{abs} [W/cm³] predstavlja gustinu apsorbovane snage, e elementarno naelektrisanje, T_g^e temperaturu gasa u jedinici [eV], k_{ei}^{el} i k_{ej}^{inel} koeficijente brzine za elastični prenos impulsa i odgovarajući neelastični proces sa energijskim pragom ε_{ej}^{thr} [eV].

Sistem jednačina (99)-(101) rešavan je u programu MATLAB korišćenjem ode15s solvera za rešavanje “stiff” sistema diferencijalnih jednačina, sa relativnom i apsolutnom tolerancijom 10^{-10} i 10^{-6} . Analogna procedura proračuna je korišćena za slučaj plazme u smeši He/O₂ na atmosferskom pritisku (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) i u slučaju modelovanja mikropražnjenja na površini u vlažnom vazduhu na atmosferskom pritisku (Sakiyama, Graves, Chang, Shimizu, Morfill, 2012). U modelu je korišćen vremenski korak 10ns i proračun je vršen za vremenski interval 15ms. Početna koncentracija elektrona je 10^{11} cm^{-3} , dok je količina vodene pare varirana tokom proračuna. Tabela 13. u Dodatku 1 sadrži listu svih elektronskih sudarnih procesa, hemijskih reakcija i procesa između teških čestica uključenih u globalni model.

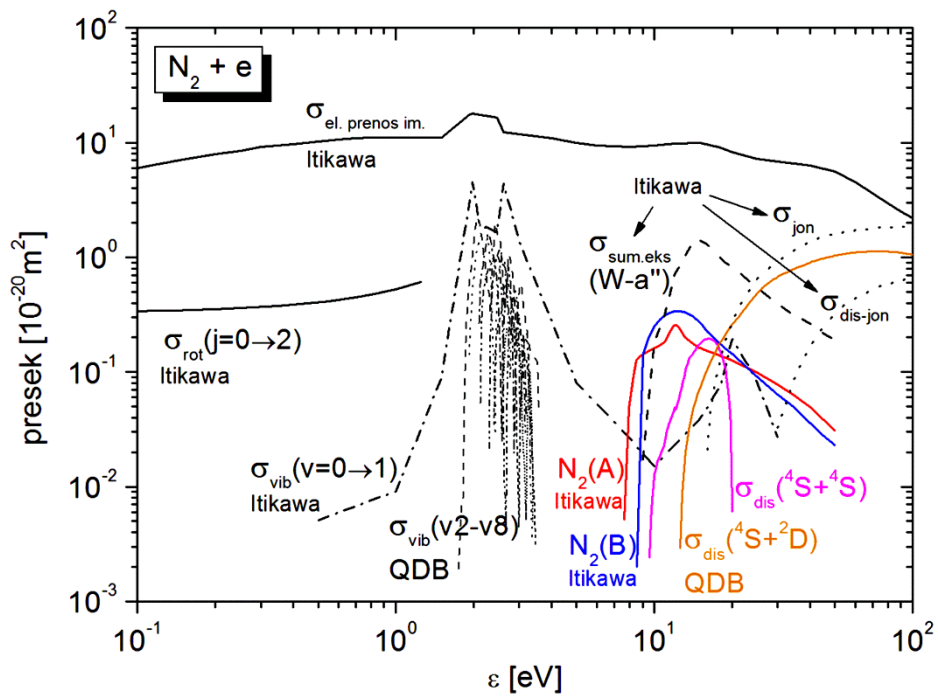
9.2 Set preseka za elektronske sudarne procese

U Poglavlju 5 prezentovana je analiza uticaja baze preseka na EEDF, transportne koeficijente i koeficijente brzine elektronskih sudarnih procesa. Obzirom da izbor koeficijenata brzine u sistemu jednačina (99)-(101) bitno utiče na rezultate samousaglašenog proračuna koncentracija i srednje energije, od posebnog je značaja da set korišćenih preseka bude kompletan. Sa druge strane, u cilju formiranja modela sa što širim setom uključenih procesa, neophodno je obezbediti odgovarajuće podatke za neke procese rasejanja elektrona na pobuđenim stanjima, koji mogu biti značajni pri određenim uslovima. Kao važan primer može se navesti jonizacija elektronskim udarom iz metastabilnog stanja $\text{He}^*(2^3\text{S}_1)$ koja, kao što je prikazano na Slici 29, može biti dominantni proces za održavanje jonizovanog stanja (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018). Pored jonizacije, zahvati elektrona na metastabilnim stanjima $\text{O}_2(a^1\Delta, b^1\Sigma)$ mogu imati uticaj na koncentraciju elektrona, zatim superelastični sudari mogu pri većoj naseljenosti metastabilnih stanja imati uticaj na EEDF itd.

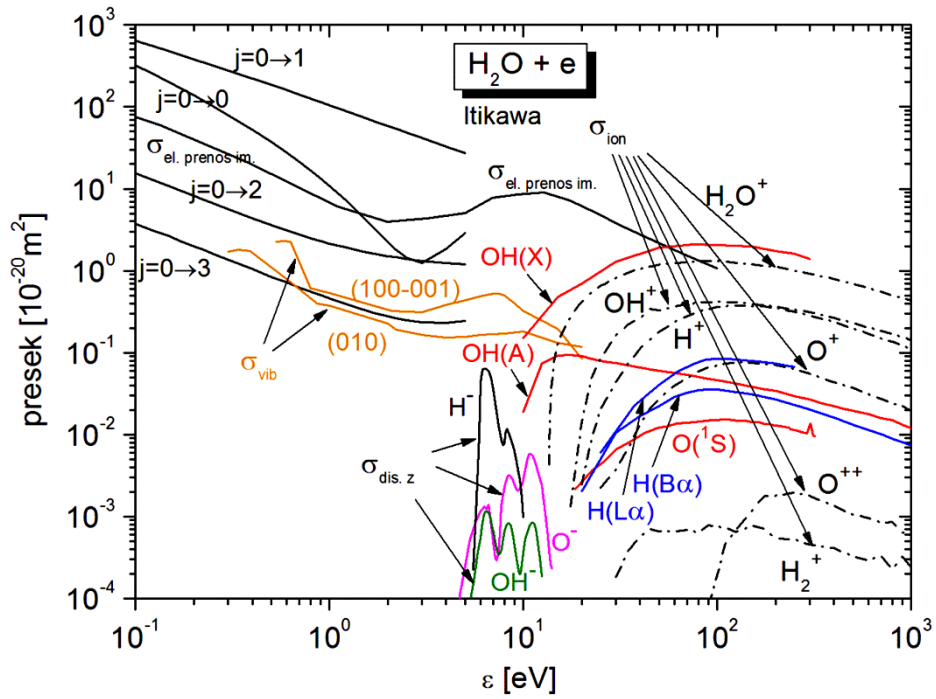
Model uključuje 162 elektronska sudarna procesa, svrstanih u Tabeli 13. (Prilog 1), sa odgovarajućim energijskim pragovima za potrebe proračuna srednje energije po modelu (101). Koeficijenti brzine za procese 2-35, 47-86 i 92-93 izračunati su primenom programa BOLSIG+ na osnovu baze preseka Quantemol-DB (Tennyson et al., 2017), pri čemu je za proces 1 i procese 75-86 korišćen presek iz baze Morgan LXCat (Morgan database, www.lxcat.net). Za procese pri kojima dolazi do izmene pobuđenog stanja 36-46, superelastične procese 87-91 i 94-104 iskorišćeni su koeficijenti iz modela (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2014) usled nedostatka podataka za preseke. Iz istih razloga za sve elektron-jonske rekombinacije 105-162 korišćeni su koeficijenti brzine iz (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2014). Obzirom da se radi o procesima sa nultim pragom, na osnovu analize u Odeljku 6.1.1 pretpostavka je da bi postojalo dobro slaganje između koeficijenata preuzetih iz literature i BE koeficijenata koji bi se računali na osnovu dostupnih preseka. Svi korišćeni preseki u proračunu EEDF pomoću programa BOLSIG+ prikazani su na Slikama 51-60.



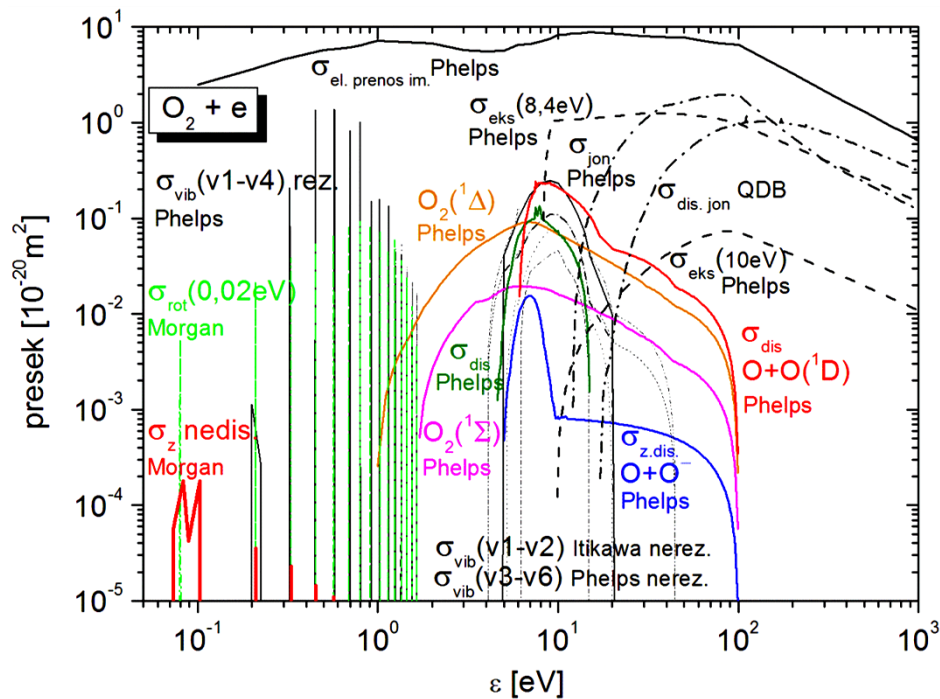
Slika 51. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na atomu He i presek za jonizaciju elektronskim udarom iz pobuđenog stanja He* (2^3S_1).



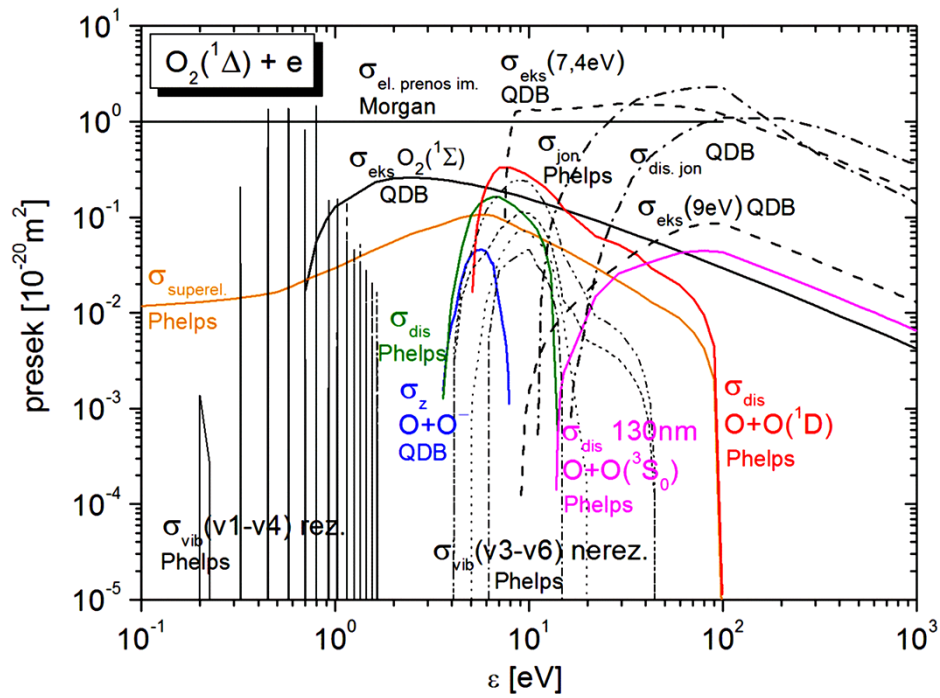
Slika 52. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na molekulu N₂.



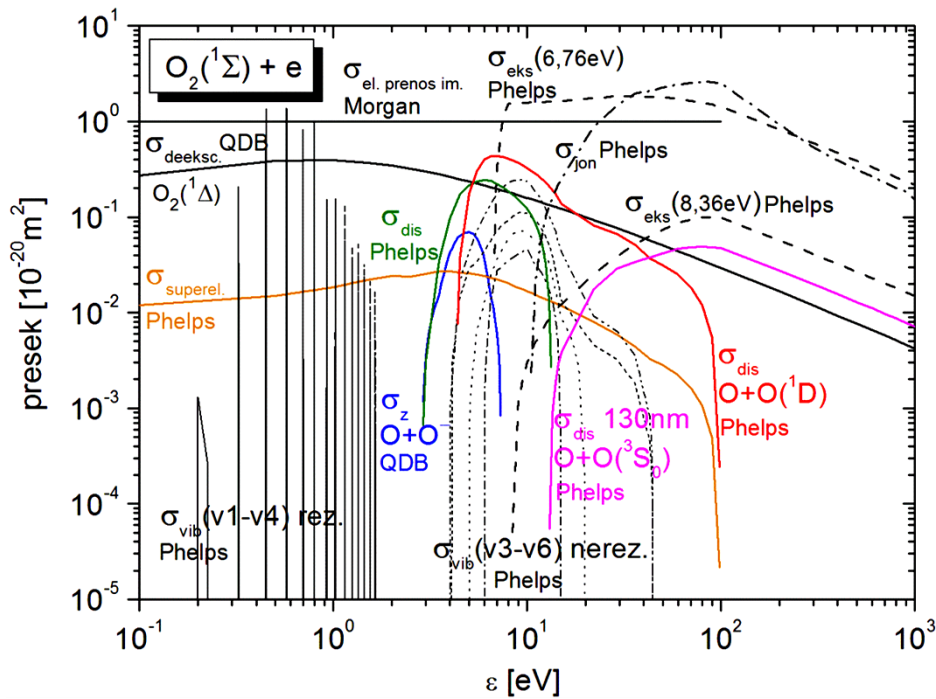
Slika 53. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na molekulu H_2O .



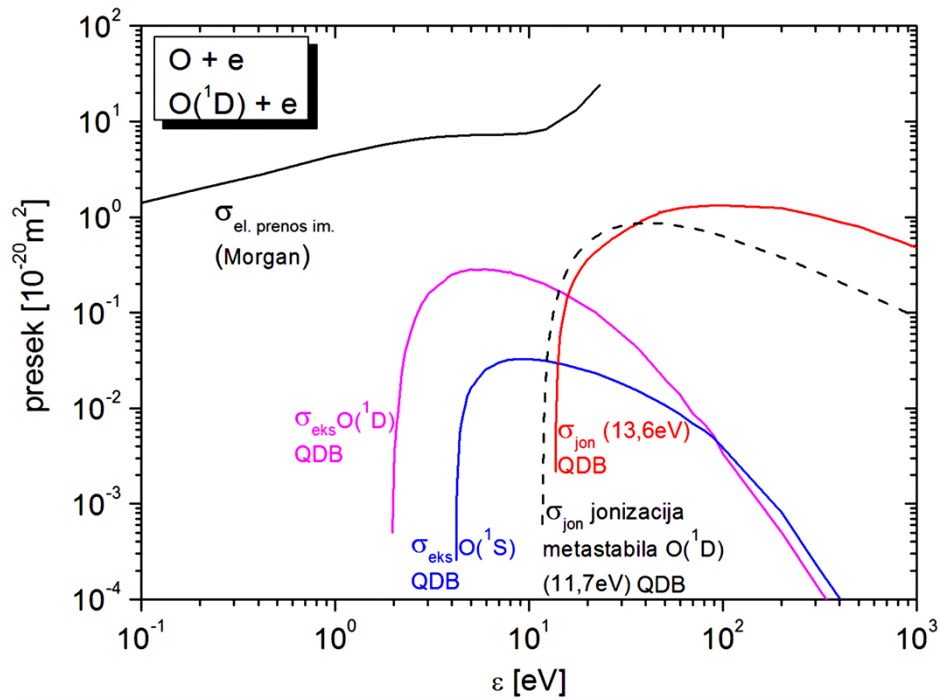
Slika 54. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na molekulu O_2 .



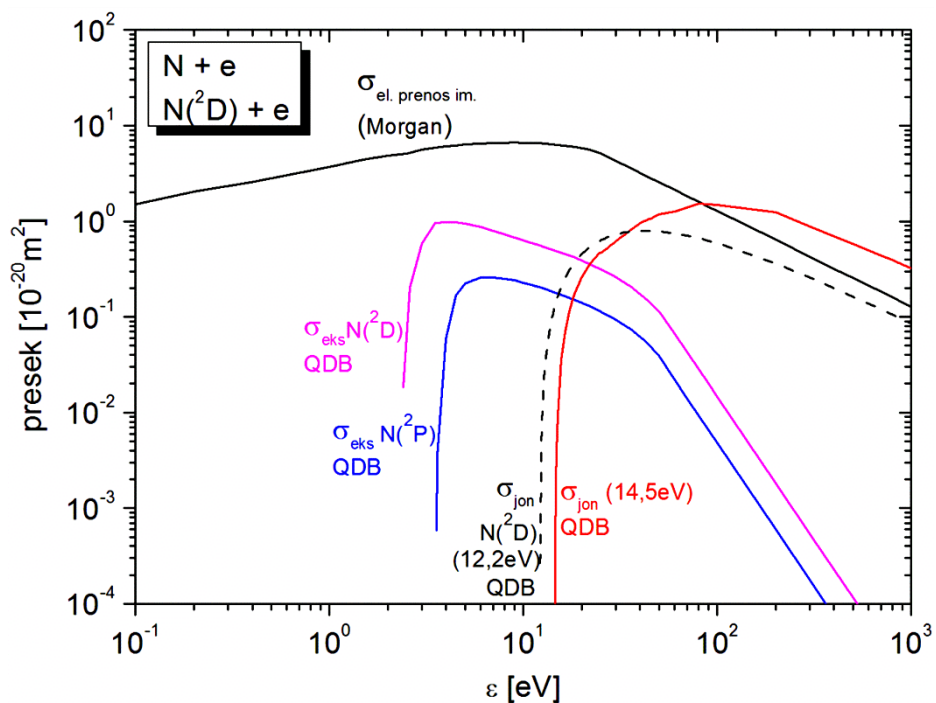
Slika 55. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na elektronski pobuđenom molekulu kiseonika $O_2(^1\Delta)$.



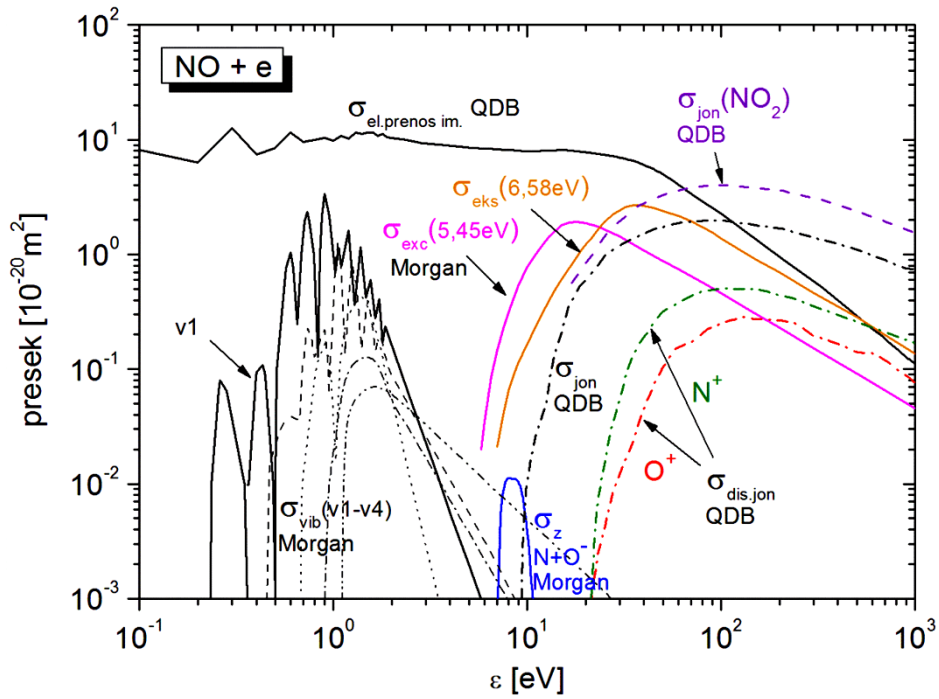
Slika 56. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na elektronski pobuđenom molekulu kiseonika $O_2(^1\Sigma)$.



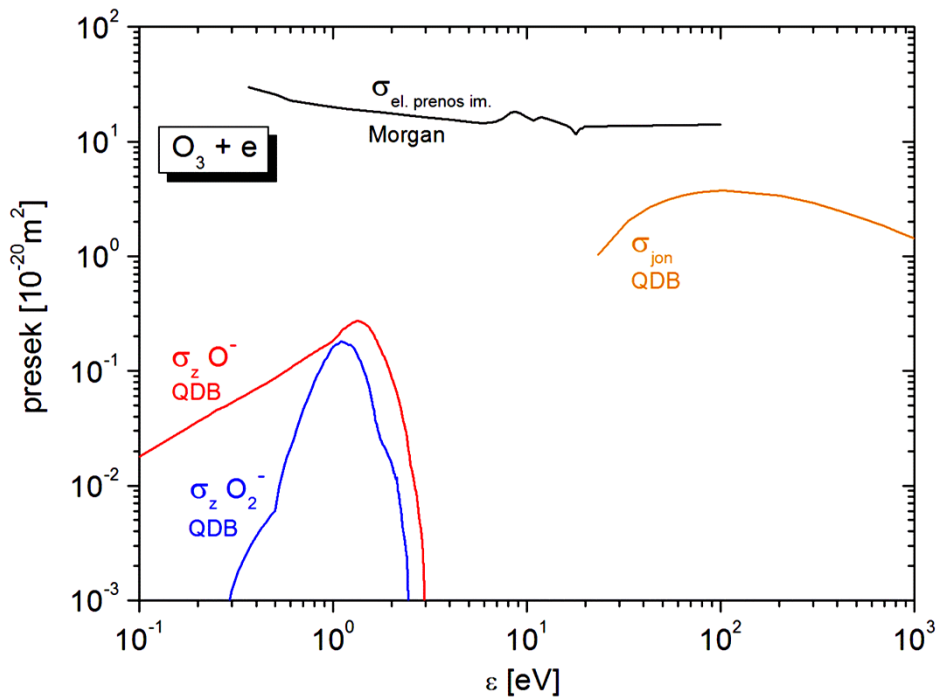
Slika 57. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na atomu O i presek za jonizaciju elektronskim udarom iz pobuđenog stanja $O(^1D)$.



Slika 58. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na atomu N i presek za jonizaciju elektronskim udarom iz pobuđenog stanja $N(^2D)$.



Slika 59. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na molekulu NO i presek za jonizaciju molekula NO₂.



Slika 60. Set korišćenih preseka za rasejanje elektrona na molekulu O₃.

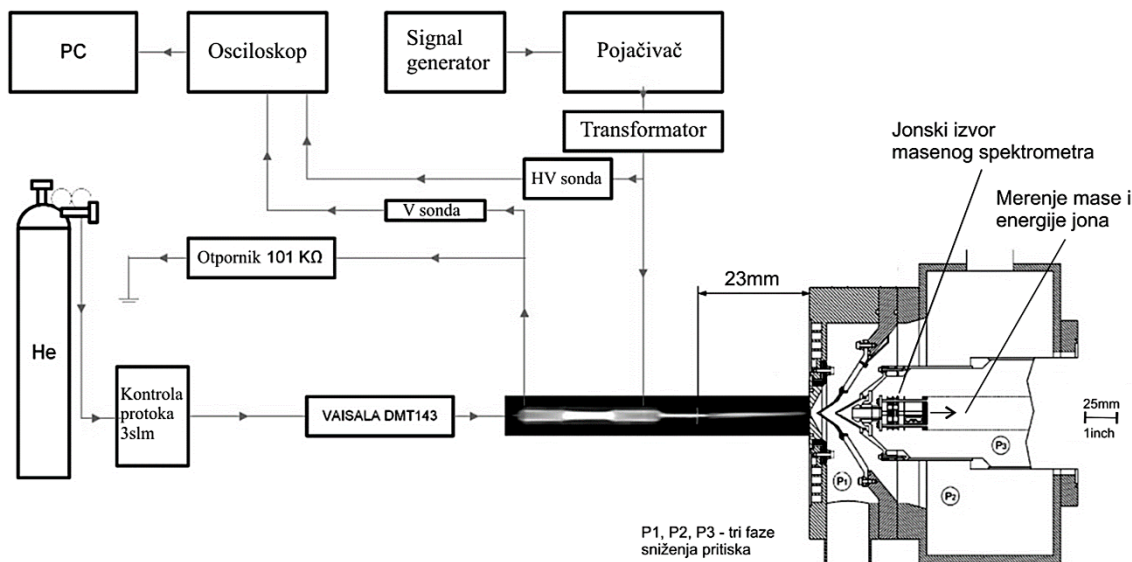
9.3 Određivanje početnih uslova za proračun i poređenje sa eksperimentom

Jedna od glavnih prednosti globalnog modela u odnosu na fluidne ili hibridne modele ogleda se u mogućnosti za detaljniju analizu hemijskog sastava plazme i mogućnosti za uključivanje velikog broja procesa u proračun. Međutim, prilikom modelovanja kompleksnih plazmenih sistema mora se imati u vidu da često postoje prostorne varijacije u vrednostima bitnih parametara kao što su koncentracija i temperatura elektrona gustina apsorbovane snage, udeo vazduha i drugih nečistoća, temperatura gasa, brzina zapreminskog protoka itd. U skladu sa tim, da bi se pomoću OD globalnog modela analiziralo kako hemijski sastav i vrednosti parametara plazme variraju od tačke do tačke sistema, neophodno je proračun vršiti za različite ulazne parametre odnosno uslove koji u tim tačkama vladaju. Kao važan primer može se navesti analiza hemijskog sastava, temperature i koncentracije elektrona duž ose plazma mlaza (van Gaens, Bogaerts, 2013; van Gaens, Bogaerts, 2014), pri čemu se za promenu gustine snage, udela vazduha i brzine protoka gasa u aksijalnom pravcu koriste analitički fitovi eksperimentalno dobijenih vrednosti. Maseni spektar pozitivnih jona, korišćen za verifikaciju globalnog modela u ovoj disertaciji, snima se na konstantnom rastojanju od otvora cevi sa plazma mlazom. Pomoću globalnog modela analiziran je hemijski sastav plazme lokalno, u jednoj tački sistema. Takođe, analiziran je uticaj bitnih parametara poput udela vazduha i vodene pare na EEDF, koncentraciju i temperaturu elektrona i sastav plazme. Prilikom procene lokalnih vrednosti brzine protoka gasa i gustine apsorbovane snage korišćeni su pojednostavljeni modeli po analogiji sa rezultatima iz literature (Liu, Bruggeman, Iza, Rong, Kong, 2010; Schröter et al., 2018b).

9.3.1 Formiranje plazma mlaza i eksperimentalna dijagnostika metodom masene spektrometrije

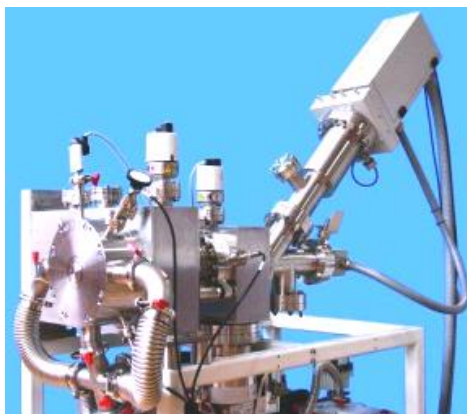
Na Slici 61. prikazana je šema eksperimenta sa plazma mlazom iz Laboratorije za gasnu elektroniku u Institutu za fiziku Univerziteta u Beogradu, pri čemu je kao dijagnostička metoda za analizu hemijskog sastava plazme korišćena masena spektrometrija. Kao osnovni gas je korišćen helijum sa konstantnim protokom 3slm

($50\text{cm}^3\text{s}^{-1}$). Konstantna vrednost protoka održavana je pomoću uređaja “Bronkhorst mass flow meter/controller“. Plazma mlaz je dielektrično barijernog tipa, sa dve cilindrične elektrode koje obavijaju staklenu cev od pireksa. Za prvu elektrodu redno je vezan otpornik od $101\text{k}\Omega$ i elektroda je uzemljena. Unutrašnji i spoljašnji prečnik cevi su 4mm i 6mm a dužina elektroda, međuelektrodno rastojanje i rastojanje od kraja napajane elektrode do ivice cevi iznose 15mm i ne menjaju se tokom eksperimenta. Signal generator proizvodi sinusni napon frekvencije 80kHz koji se zatim pojačava pomoću pojačivača i transformatora do amplitude $3,1\text{kV}$ i dovodi na napajanu elektrodu. Pomoću naponske (V) i visokonaponske (HV) sonde koje su vezane za osciloskop merene su električne karakteristike plazma mlaza i kontrolisana snaga koja se dovodi pražnjenju. Za merenje koncentracije vodene pare deponovane na zidu u sistemu sa protokom korišćen je uređaj “Vaisala DMT143“, smešten između rezervoara sa helijumom i plazma mlaza, pri čemu je za eliminaciju deponovane pare i postizanje stabilnog sastava smeše potrebno nekoliko sati protoka gasa. Za merenje temperature i relativne vlažnosti okolnog vazduha korišćen je higrometar “EXTECH“. Za dva uzastopna dana tokom kojih su vršena merenja, temperatura vazduha je bila $23,3^\circ\text{C}$ i $23,5^\circ\text{C}$ a relativna vlažnost $34,5\%$ i $26,2\%$.



Slika 61. Šema eksperimenta sa plazma mlazom i masenim spektrometrom, Laboratorija za gasnu elektroniku, Institut za fiziku Univerziteta u Beogradu.

Maseni spektrometar (engl. molecular beam mass spectrometer, MBMS) "HIDEN HPR 60" koji uzorkuje plazmu direktno sa atmosferskog pritiska korišćen je za snimanje masenog spektra pozitivnih jona. Nakon prolaska kroz analizator joni ulaze u detektor (fotomultiplikator) i meri se struja jona. Da bi joni stigli do detektora moraju biti na veoma niskom pritisku ($\sim 10^{-8}$ bar). Specifičnost spektrometra "HIDEN HPR 60" je što se na prednjoj strani nalazi ravna ploča sa malim otvorom (prečnik 0,1mm) kroz koji prolaze produkti pražnjenja. Tako se formira snop čestica koji dolazi do detektora na niskom pritisku prolazeći kroz trostepeni vakuumski sistem komora P_1 , P_2 i P_3 . Vrednosti pritiska u komorama tokom eksperimenta su bile $p_1 = 4,0 \cdot 10^{-1}$ Torr, $p_2 = 7,4 \cdot 10^{-6}$ Torr, $p_3 = 3,7 \cdot 10^{-7}$ Torr. Ovim masenim spektrometrom mogu se snimati spektri neutralnih čestica, negativnih i pozitivnih jona, pri čemu je za snimanje spektra neutrala najpre neophodno izvršiti jonizaciju čestica pomoću jonizacionih filamenata. Obzirom da je u eksperimentu sniman maseni spektar pozitivnih jona, jonizacioni filamenti su bili isključeni kako bi svi detektovani joni poticali samo iz plazme. Više detalja u vezi masenog spektrometra "HIDEN HPR 60" može se naći u (Maletić et al., 2015; Maletić et al., 2017; Puač et al., 2012). Fotografija laboratorijskog uređaja prikazana je na Slici 62.



Slika 62. Fotografija MBMS (https://www.hidenanalytical.com/wp-content/uploads/2016/06/HPR_60_Applications_Widescreen.pdf).

Prilikom snimanja masenog spektra jona rastojanje između otvora cevi plazma mlaza i otvora MBMS spektrometra iznosilo je 23mm, međutim nije uočeno prostorno širenje plazme unutar spektrometra niti pojačani intenzitet svetlosti kao posledica

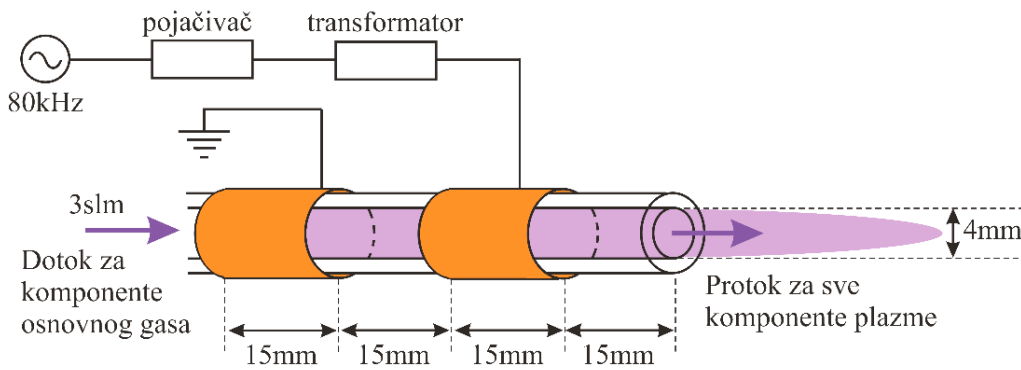
povećanja gustine snage usled interakcije plazme sa metalnim zidom spektrometra, koji se može smatrati uzemljenom metalnom metom/elektrodom. Na manjim rastojanjima (manjim od 1cm) javlja se izražen plazmeni kanal sa visokim intezitetom emisije svetlosti i ne dolazi do prostiranja PAPS-ova (Maletić et al., 2015; Maletić et al., 2017; Puač et al., 2012). Takođe, mogu se javiti dodatni efekti (Robert et al., 2014) kao što su povratni jonizacioni talasi, koji bi morali da se na adekvatan način analiziraju i uključe prilikom modelovanja (Babaeva et al., 2019). Na većim rastojanjima plazmeni kanal poseduje drugačije karakteristike i može se registrovati nastanak i prostiranje PAPS-ova, karakteristično za plazma mlaz koji se prostire kroz slobodan prostor. Dakle, rastojanje na kom se snima maseni spektar u eksperimentu odabrano je tako da tretirani plazma mlaz u dobroj meri odgovara mlazu koji se prostire kroz slobodan prostor, bez značajnog uticaja metalnih ili dielektričnih zidova. Daljim povećanjem rastojanja između otvora cevi plazma mlaza i otvora MBMS spektrometra dolazi do značajnog slabljenja merenog signala zbog kratkog srednjeg slobodnog puta jona na atmosferskom pritisku. Takođe, u kontaktu plazme sa metalnom površinom poput mikro-mlaza značajni su procesi na površini (Schröter et al., 2018a), dok je plazma mlaz korišćen u eksperimentu DBD tipa.

Imajući u vidu navedena ograničenja, eksperimentalna metoda za analizu sastava plazme bazirana na masenoj spektrometriji (Murakami, Niemi, Gans, O'Connell, Graham, 2013a; Maletić et al., 2012; Stancampiano, Selaković, Gherardi, Puač, Petrović, Colombo, 2018) ipak poseduje značajne prednosti u odnosu na druge metode poput optičke emisije spektroskopije, laserski indukovane fluorescencije (engl. laser induced fluorescence, LIF) ili UV apsorpcione spektroskopije, VUV Furije transform spektroskopije (Yonemori et al., 2012; Schröter et al., 2018b; Zhang et al., 2013; van Gessel, Hrycak, Jasinski, Mizeraczyk, der Mullen, Bruggeman, 2013) itd. Navedene metode su ograničene na merenje malog broja vrsta, pre svega pobuđenih stanja i zavise od uslova kao što su naseljenost ovih stanja ili efekata širenja spektralnih linija usled pritiska, električnog i magnetnog polja. Koncentracija nekih čestica može biti isuviše niska da bi se mogle detektovati putem ovih metoda merenja. Sa druge strane, metoda masene spektrometrije ne zavisi od navedenih uslova a istovremeno omogućava detaljniju analizu hemijskog sastava plazme obzirom da se pomoću nje mogu detektovati signali većeg broja vrsta, neutralnih čestica u osnovnom stanju i jona.

9.3.2 Proračun protoka gasa

Obzirom da se u eksperimentu plazma mlaz realizuje sa konstantnim protokom 3slm, konfiguracijom elektrodnog sistema 15mm-15mm-15mm-15mm sa unutrašnjim prečnikom cevi 4mm (Slika 61 i 63), konstantan faktor F_i/V u jednačini (99) iznosi:

$$\frac{F_i}{V} = \frac{3\text{slm}}{r^2\pi l} \cong 66,4 \frac{1}{\text{s}}. \quad (102)$$



Slika 63. Šema plazma mlaza sa bitnim elementima za proračun protoka.

Za komponente osnovnog gasa uračunava se pozitivan doprinos protoka, odnosno dotok u reaktor na početku simulacije ($t = 0$), dok se za sve komponente, uključujući i osnovne, u balansnim jednačinama (99) uračunava potrošnja usled protoka ($F_i n_i(t)$)/ V tokom vremena koja zavisi od njihove koncentracije $n_i(t)$. Iako je u eksperimentu kao osnovni gas u cevi korišćen helijum (sa određenom količinom vodene pare), obzirom da su merenja vršena na rastojanju 23mm od kraja cevi, zbog mešanja sa vlažnim vazduhom i prirode globalnog modela, vazduh i vodena para su uključeni kao sastojci osnovnog gasa prilikom proračuna (Tabela 12). Efekti protoka se ne računaju u balansnoj jednačini za elektrone (100), na osnovu pretpostavke da na koncentraciju elektrona daleko izraženiji uticaj imaju nekonzervativni procesi i činjenice da elektroni, zbog mnogo manje mase u odnosu na masu teških čestica ($m_e/M_i \sim 10^{-4} - 10^{-5}$) nisu nosioci masenog/zapreminskog protoka.

9.3.3 Procena gustine apsorbovane snage

Važan parametar za proračun temperature elektrona predstavlja snaga koju elektroni dobijaju od električnog izvora po jedinici zapremine S_{abs} , koja zavisi od oblika elektrodnog sistema, oblika primenjenog potencijala, kao i prostorne raspodele naelektrisanja u plazmi. Jedan od načina za proračun gustine apsorbovane snage jeste u formi Džulovih gubitaka $\vec{j} \cdot \vec{E}$ (Dorai, Kushner, 2003; van Gaens, Bogaerts, 2013), međutim takav pristup zahteva rešavanje Poasonove jednačine (76) i proračun gustine kondukcione struje (77) na osnovu fluidnih modela, koji nameću ograničenja u smislu ukupnog broja fizičkih i hemijskih procesa koji mogu biti uključeni u proračun.

Vrednost za gustinu apsorbovane snage je procenjena na osnovu strujno-naponske karakteristike pražnjenja iz (Puač, Maletić, Lazović, Malović, Đorđević, Petrović, 2010) u formi aktivne snage $P = I_{ef} U_{ef} \cos\varphi$ po jedinici zapremine, po analogiji sa modelom iz (Schröter et al., 2018b). U modelu snaga predata plazmi je računata iz razlike snaga u sistemu kada ima plazme i kada je plazma isključena:

$$P = P_{ON} - P_{OFF} = \frac{I_0^{ON} U_0^{ON}}{2} \cos\varphi^{ON} - \frac{I_0^{OFF} U_0^{OFF}}{2} \cos\varphi^{OFF} \cong 3,68W. \quad (103)$$

pri čemu su procenjene vrednosti $I_0^{ON} \cong 2,9mA$, $I_0^{OFF} \cong 1,5mA$, $U_0^{ON} \cong 3kV$, $U_0^{OFF} \cong 3,1kV$, $\cos\varphi^{ON} \cong 0,9$ i $\cos\varphi^{OFF} \cong 0,1$. Na osnovu rezultata iz (Maletić et al., 2018) za plazma mlaz iste konfiguracije pri protoku 4slm izmerena snaga koja se predaje plazmi leži u intervalu 1,6 – 5W, dok je za vrednost amplitude napona 3kV predata snaga 4,0W.

U cilju proračuna temperature elektrona pomoću jednačine (101) neophodno je snagu (103) normirati na određenu zapreminu - “zapreminu plazme” koju je veoma teško proceniti. U prvoj aproksimaciji, obzirom da je snaga izračunata na osnovu struje i napona, normiranjem na zapreminu međuelektrodnog prostora unutar cilindrične cevi (Slika 63) dobija se vrednost:

$$S_{abs} = \frac{P_{ON} - P_{OFF}}{V} \cong 4,9 \frac{W}{cm^3}. \quad (104)$$

Ova vrednost se može korigovati iz više razloga. Najpre, pod plazma mlazom se podrazumeva plazmeni kanal van cevi sa pražnjenjem kroz koji se prostiru PAPS-ovi i njegova zapremina se razlikuje u odnosu na zapreminu cevi. Takođe, mogu se javiti efekti koji potiču od kontakta plazme sa metalnom površinom, diskutovani u Odeljku 9.3.1. U skladu sa tim, vrednost (104) pri proračunu temperature elektrona uzeta je sa relativnom greškom $\pm 25\%$, odnosno procenjen je interval za gustinu snage:

$$S_{abs} = (4,9 \pm 1,2) \frac{W}{\text{cm}^3}. \quad (105)$$

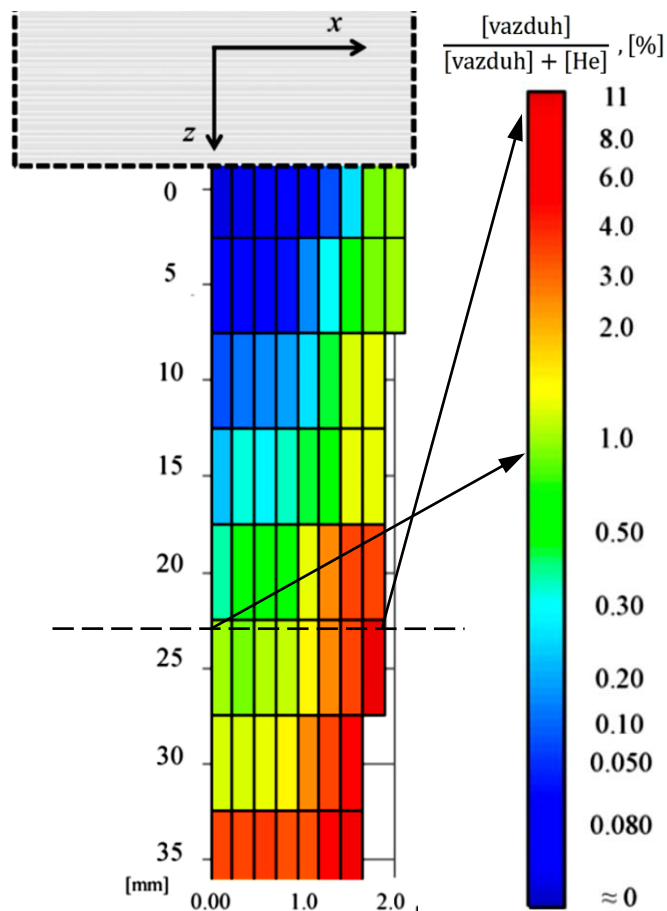
9.3.4 Procena za udeo vazduha i vodene pare; Uticaj vazduha i vodene pare na EEDF

Kao što je prikazano u Tabeli 12, u inicijalnom sastavu smeše prilikom proračuna uključeno je 10000ppm odnosno 1% vazduha (78% N₂, 21% O₂, 10⁻² % CO₂, 10⁻³ % N₂O, 10⁻⁵ % NO₂, 10⁻⁶ % NO). Ova vrednost za udeo vazduha u helijumu na 23mm od otvora cevi, na osi mlaza, procenjena je na osnovu merenja LIF metodom za He plazma mlaz koji se prostire u atmosferi vlažnog vazduha, analogne konfiguracije i sa istim protokom 3slm. Slika 64. ilustruje aksijalnu i radijalnu raspodelu udela vazduha u odnosu na helijum, preuzeta iz (Yonemori et al., 2012). Nakon inicijalnog proračuna hemijskog sastava plazme udeo vazduha je variran u vrednostima 0,5%, 1,5%, 2% i najbolja reprodukcija masenog spektra jona pomoću globalnog modela postiže se za vrednost 1%.

U globalnom modelu je pored vazduha kao sastojak inicijalne smeše dodata vodena para u cilju pojačane proizvodnje reaktivnih vrsta. Udeo vodene pare je variran od 20ppm do 10000ppm u cilju analize uticaja vodene pare na parametre i sastav plazme kao i postizanja što boljeg slaganja rezultata modela sa izmerenim masenim spektrom jona.

Za svaku vrednost udela vazduha i vodene pare BE EEDF i koeficijenti brzine elektronskih sudarnih procesa su posebno računati pomoću programa BOLSIG+, a na osnovu preseka prikazanih na Slikama 51-60. U cilju proračuna koeficijenata brzine za sve elektronske procese iz Tabele 13. (Prilog 1), uključeni su preseki za vrste O (50 ppm), N (40 ppm), O₃ (6 ppm), NO (50 ppm), NO₂ (150 ppm), He* (10⁻⁶ ppm),

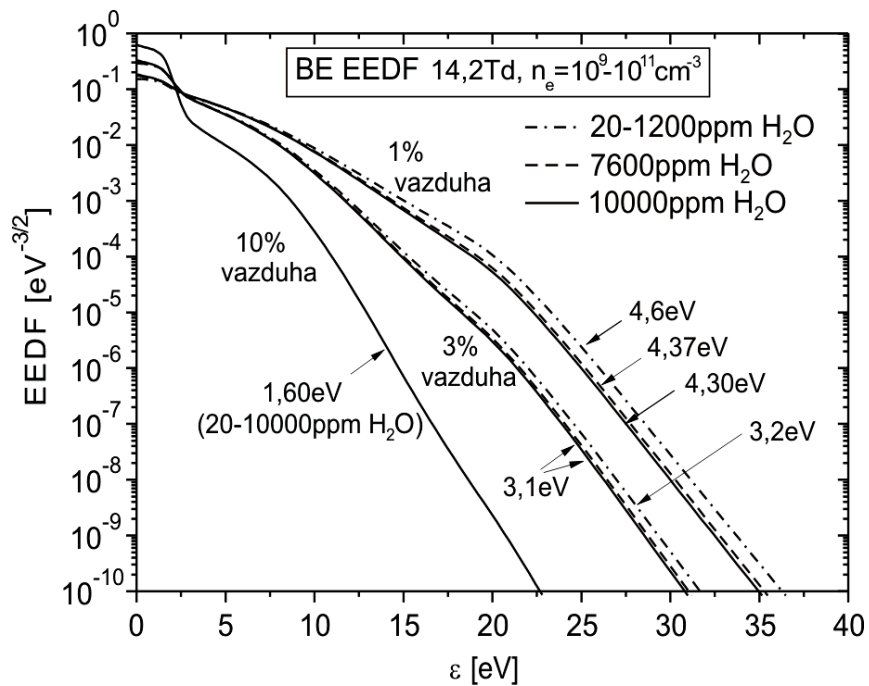
$O_2(^1\Delta)$ (30 ppm), $O_2(^1\Sigma)$ (1 ppm), $O(^1D)$ (10^{-2} ppm) i $N(^2D)$ (0.2 ppm). Molski udeli ovih vrsta određeni su na osnovu rezultata globalnog modela, odnosno proračunatog sastava smeše nakon 10ms.



Slika 64. Skica radijalne i aksijalne raspodele udela vazduha u odnosu na helijum na osnovu LIF merenja iz (preuzeto iz: Yonemori et al., 2012, prevedeno na srpski).

Na Slici 65. prikazane su BE EEDF za 1%, 3% i 10% vazduha, dok je za svaku od ovih vrednosti udeo vodene pare variran u vrednostima 20ppm, 400ppm, 1200ppm, 2000-10000ppm. Može se primetiti da veći udeo vazduha snižava rep raspodele, kao i srednju energiju elektrona, prevashodno zbog velikog broja uključenih disocijacija, ekscitacija i jonizacija kod N_2 i O_2 . Veći udeo vodene pare pri istom udelu vazduha snižava i srednju energiju i rep raspodele. Takođe, u skladu sa rezultatima publikovanim

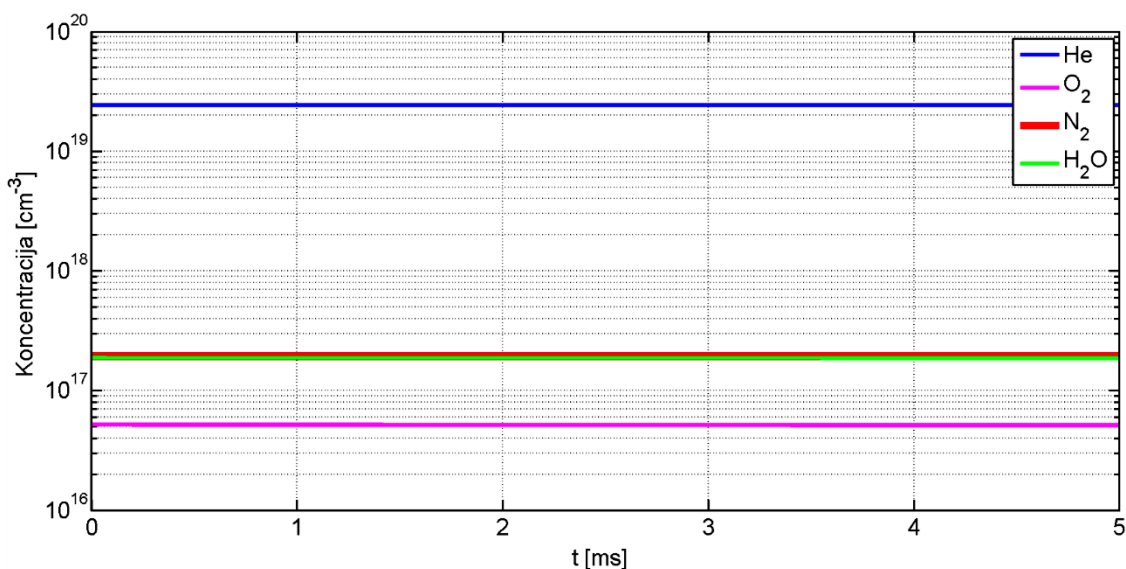
u (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018) kao bitan parametar koji može uticati na EEDF varirana je i koncentracija elektrona, međutim u intervalu karakterističnom za LTP $10^9 - 10^{11} \text{cm}^{-3}$ nema izražen uticaj na EEDF. Najbolja reprodukcija merenog masenog spektra jona globalnim modelom postiže se za 7600ppm H_2O .



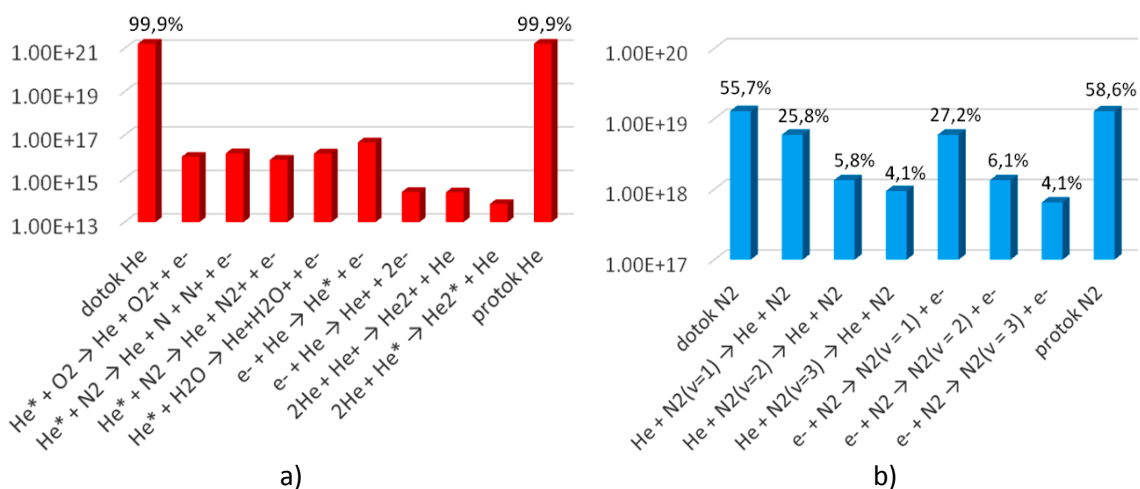
Slika 65. BE EEDF za različite udele vazduha i vodene pare.

9.4 Uticaj protoka na kinetiku osnovnih sastojaka smeše

Na Slici 66. prikazane su koncentracije najzastupljenijih sastojaka smeše He, O₂, N₂ i H₂O tokom vremena, na osnovu globalnog modela za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare. Prilikom proračuna sastav osnovnog gasa ostaje konstantan. Na Slikama 67a,b) prikazani su prinosi proizvodnje i potrošnje He i N₂ izračunati nakon 5ms. Zbog visokih koncentracija najizraženiji uticaj na kinetiku imaju članovi koji opisuju efekte protoka, pri čemu je dotok gasa uravnotežen potrošnjom usled protoka. Kod N₂ se uspostavlja dinamička ravnoteža između vibracionih ekscitacija u sudaru sa elektronima i deekscitacija u sudaru sa atomima helijuma, što takođe važi za O₂ i H₂O.



Slika 66. Koncentracije osnovnih sastojaka smeše tokom vremena.



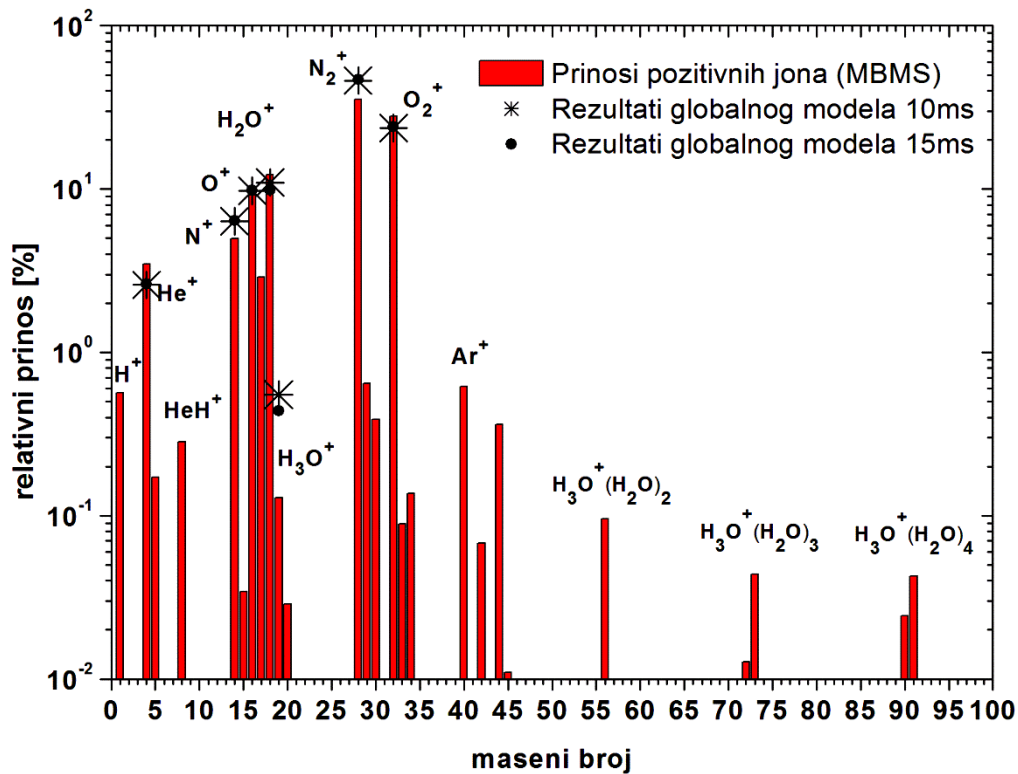
Slika 67. Prinosi [cm⁻³/s] proizvodnje i potrošnje za He a) i N₂ b).

9.5 Modelovanje masenog spektra pozitivnih jona

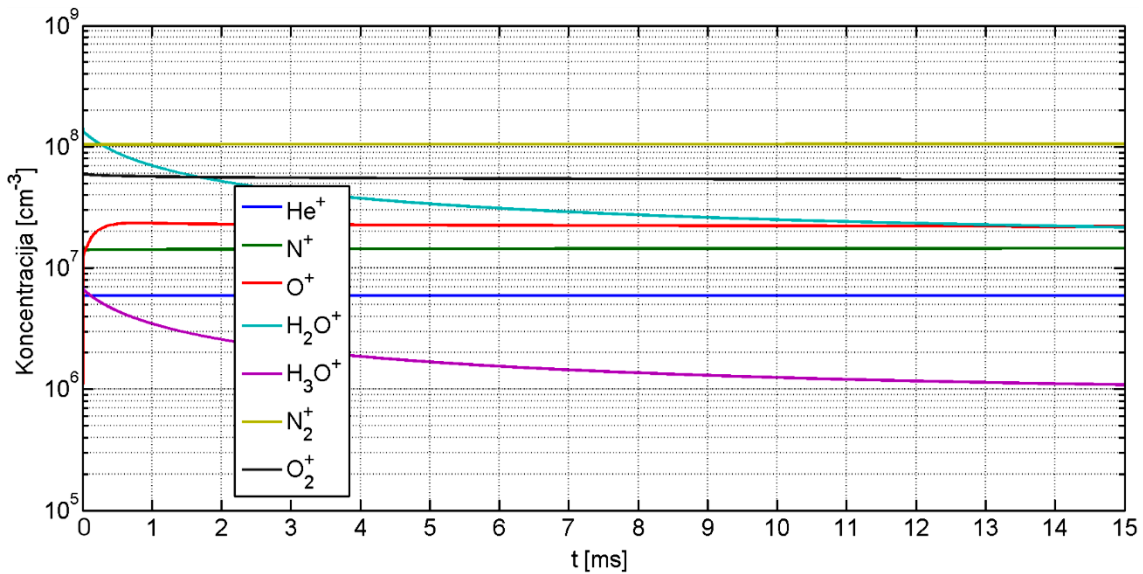
Slika 68. prikazuje maseni spektar pozitivnih jona za plazma mlaz opisan u Odeljku 9.3.1 snimljen pomoću MBMS spektrometra u intervalu masenih brojeva 1-100 atomskih jedinica mase (crveni barovi), kao i dva seta rezultata globalnog modela za najzastupljenije jone za 10ms i 15ms pri 1% vazduha i 7600ppm vodene pare. Rezultati merenja i modela izraženi su u formi relativnih prinosa u cilju preciznijeg poređenja, obzirom da relativni prinosi imaju veliku osetljivost na apsolutne promene koncentracija pojedinačnih jona. Relativni prinosi u eksperimentu i modelu određuju se na osnovu izraza:

$$Y_i [\%] = \frac{N_i}{\sum_j N_j} \cdot 100\% = \frac{n_i}{\sum_j n_j} \cdot 100\% , \quad (106)$$

gde N_i i N_j predstavljaju apsolutna odbrojavanja MBMS spektrometra za jone vrste i i vrste j (merene signale) a n_i i n_j odgovarajuće apsolutne koncentracije izračunate globalnim modelom, prikazane na Slici 69. u vremenskom intervalu 15ms za koji se postiže potpuna saturacija računatih vrednosti tokom vremena.



Slika 68. Spektar jona (crveni barovi) i rezultati modela (1% vazduha, 7600ppm H₂O).

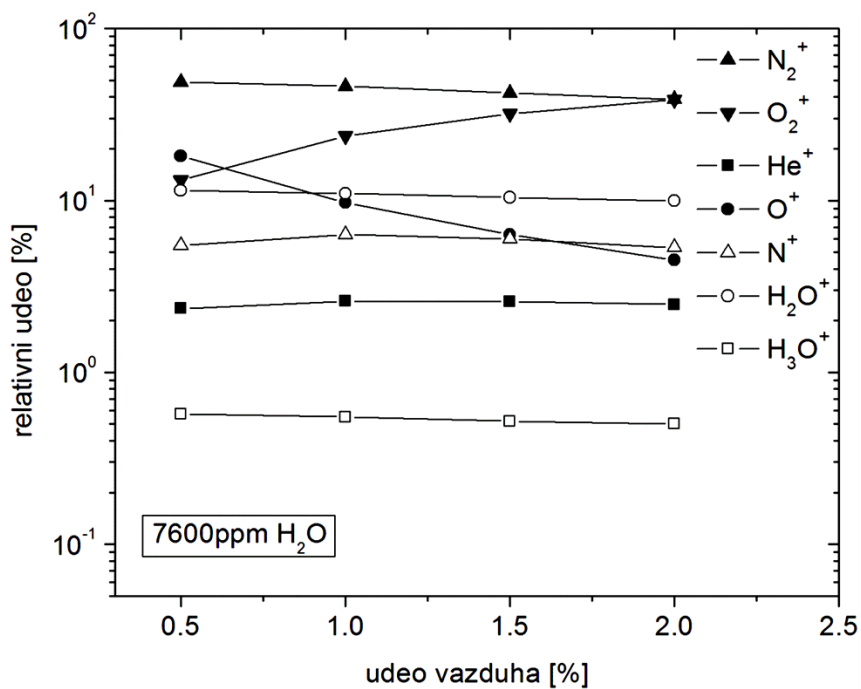


Slika 69. Vremenska evolucija koncentracije najzastupljenijih jona na osnovu rezultata globalnog modela sa 1% vazduha i 7600ppm vodene pare.

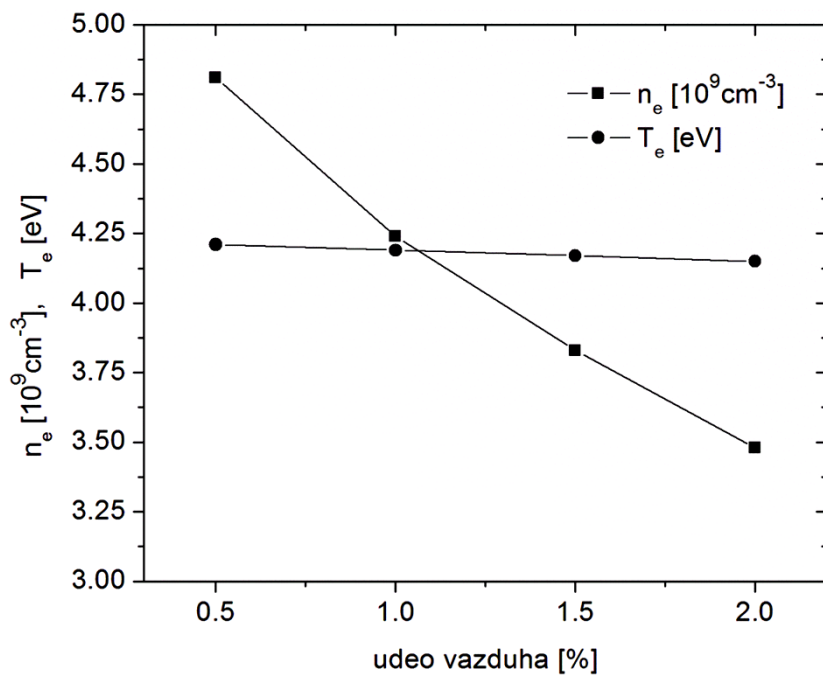
Imajući u vidu sva ograničenja 0D modela, može se zaključiti da postoji veoma dobro slaganje rezultata proračuna sa merenim vrednostima jona N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ , H_2O^+ i He^+ (Slika 68), dok je odstupanje kod jona H_3O^+ reda 0,1% i leži u intervalu nesigurnosti greške merenja. Joni Ar^+ potiču od nečistoća argona u helijumu i nisu uključeni u modelu, kao ni hidrati višeg reda (Tabela 12). Na promene izračunatih koncentracija tokom vremena (Slika 69) bitno utiču glavni procesi proizvodnje i gašenja jona, šematski prikazani u Odeljku 9.7. Najbolje slaganje između merenih i izračunatih prinosa dobija se za 1% vazduha, što odgovara merenoj vrednosti na osi plazma mlaza za rastojanje 23mm na osnovu LIF merenja iz rada (Yonemori et al., 2012), kao i 7600ppm vodene pare. Uticaj vodene pare na parametre plazme i hemijski sastav analiziran je u Odeljcima 9.8 i 9.9.

U cilju analize kako udeo vazduha utiče na koncentraciju pozitivnih jona, izvršen je proračun za 0,5%, 1,5% i 2,0% vazduha i rezultati modela su prikazani na Slici 70 za 10ms i 7600ppm H_2O . Slika 71. prikazuje uticaj vazduha na koncentraciju i temperaturu elektrona. Povećanje udela vazduha u smeši prevashodno snižava koncentraciju elektrona usled veće koncentracije kiseonika i izraženijeg zahvata, dok se temperatura elektrona smanjuje zbog izraženijih gubitaka energije u procesima rasejanja elektrona na molekulima N_2 i O_2 . To utiče na koncentracije jona kroz promene u prinosima procesa jonizacije elektronskim udarom. U cilju pojašnjenja rezultata modela

prikazanih na Slici 70. moraju se imati u vidu glavni kanali proizvodnje i gašenja jona, detaljno analizirani u Odeljku 9.7.



Slika 70. Uticaj udela vazduha na relativne prinose jona nakon 10ms, na osnovu globalnog modela sa 7600ppm vodene pare.



Slika 71. Uticaj udela vazduha na koncentraciju i temperaturu elektrona nakon 10ms, na osnovu globalnog modela sa 7600ppm vodene pare.

Na osnovu rezultata modela sa Slike 70. i LIF merenja (Yonemori et al., 2012), može se zaključiti da 1% predstavlja optimalnu vrednost udela vazduha u plazmi na rastojanju 23mm od otvora cevi na osi plazma mlaza.

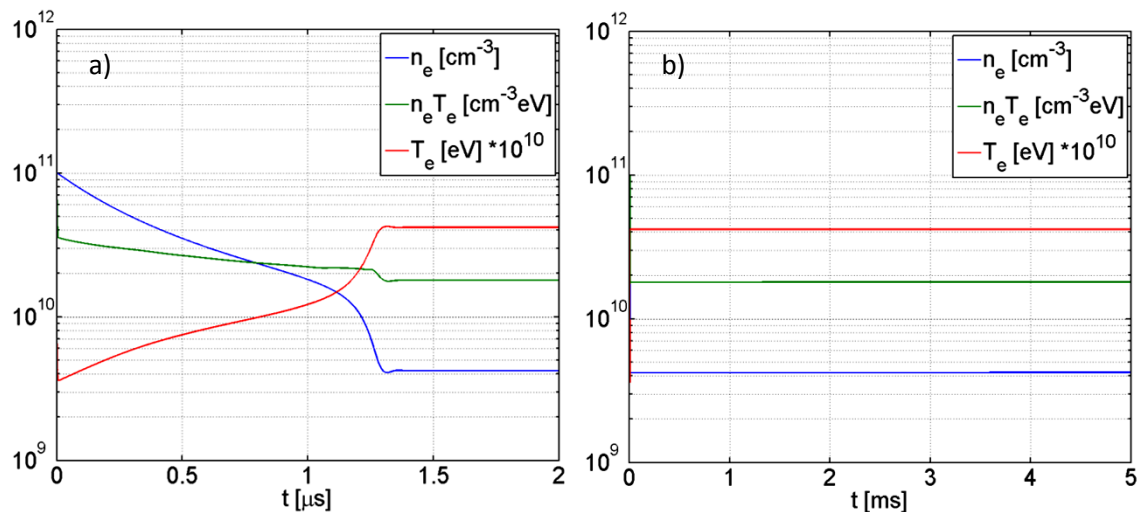
Dobro slaganje izračunatih rezultata sa merenim vrednostima na Slici 68, uz analizu koja sledi na osnovu Slike 70. i merenih rezultata iz (Yonemori et al., 2012), korišćeno je kao osnova za verifikaciju 0D globalnog modela sa proračunom koncentracije i temperature elektrona.

9.6 Proračun koncentracije i temperature elektrona za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare

U ovom Odeljku prikazani su rezultati proračuna koncentracije i temperature elektrona na osnovu jednačina (100) i (101) za vremenski interval $2\mu\text{s}$ i 5ms. Treba imati u vidu da se tokom prvih nekoliko mikrosekundi plazma formira, odnosno da se radi o prelaznom režimu u okviru kojeg se apsolutni prinosi proizvodnje i gašenja za svaku vrstu čestica mogu bitno razlikovati, a dolazi do izražene vremenske promene u koncentraciji i temperaturi elektrona (Slika 72a). Snižavanje koncentracije elektrona usled procesa zahvata ima za posledicu povećanje vrednosti temperature elektrona, pri čemu se u dobroj meri održava balans ukupne srednje energije $n_e T_e$ [cm^{-3}eV]. Tokom dužih vremenskih intervala dolazi do uspostavljanja dinamičke ravnoteže između svih procesa uključenih u (100)-(101) (Slika 72b).

Koeficijenti brzine bitno utiču na gubitke energije elektrona kroz apsolutne prinose elektronskih sudarnih procesa, kao i na smanjenje broja elektrona u slučaju procesa zahvata. Sa druge strane zavise od energije elektrona na složen način i promene u njihovim vrednostima sa energijom su izraženije u slučaju procesa sa visokim pragom. Pored toga, jednačina balansa energije (101) se rešava samousaglašeno sa sistemom jednačina za koncentracije komponenata plazme (99), od kojih one sa većom koncentracijom bitno utiču na prinose procesa u kojima elektroni gube ili dobijaju energiju, EEDF a time i na koeficijente brzine. Dakle, jednačina (101) daje optimalnu vrednost temperature elektrona za koju, pri odgovarajućim radnim uslovima, dolazi do uspostavljanja složene ravnoteže između procesa koji dovode do porasta i smanjenja energije elektrona. Istovremeno, jednačina (100) daje optimalnu vrednost koncentracije

elektrona za koju dolazi do uspostavljanja ravnoteže između svih nekonzervativnih procesa (jonizacija, zahvat, rekombinacija, itd.). Kao najvažniji parametri plazme, koncentracija i temperatura elektrona u daljem bitno utiču na prinose proizvodnje i gašenja svih čestica plazme, jona i neutrala.



Slika 72. Koncentracija i temperatura elektrona tokom vremena na osnovu globalnog modela za 1% vazduha i 7600ppm H₂O u toku $2\ \mu\text{s}$ a) i $5\ \text{ms}$ b)

9.7 Glavni kanali proizvodnje i gašenja pozitivnih jona za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare

Jedna od najznačajnijih prednosti globalnog modela u odnosu na fluidne i hibridne ogleda se u mogućnosti za detaljnu analizu hemijske kinetike, odnosno za određivanje svih važnih kanala produkcije i gašenja uključenih čestica. Obzirom da globalni model omogućava uključivanje veoma velikog broja procesa u proračun, mogu se javiti izvesne razlike u kinetici pojedinih vrsta između fizički primarnih procesa koji prevashodno dolaze do izražaja tokom inicijalnog formiranja plazme i hemijskih procesa koji se mogu javiti sa povećanjem kompleksnosti hemijskog sastava plazme. U cilju detaljnijeg pojašnjenja rezultata prikazanih na Slikama 68-70, glavni kanali proizvodnje i gašenja najbitnijih pozitivnih i negativnih jona, uključenih u globalni model, prezentovani su na Slikama 73-82, dok u Odeljku 9.10 i 9.11 sledi analiza važnih kanala proizvodnje i gašenja za sve preostale vrste uključene u modelu. Za svaku

grupu čestica hemijska kinetika je analizirana za vremenske intervale $1\mu\text{s}$ i 5ms , kako bi se diskutovale razlike između inicijalnih procesa i procesa koji se javljaju u plazmi složenijeg hemijskog sastava. Svi rezultati na Slikama 73-82. odnose se na udeo vazduha 1% i 7600ppm vodene pare, odnosno uslove za koje je postignuto najbolje slaganje između rezultata modela i merenog spektra jona.

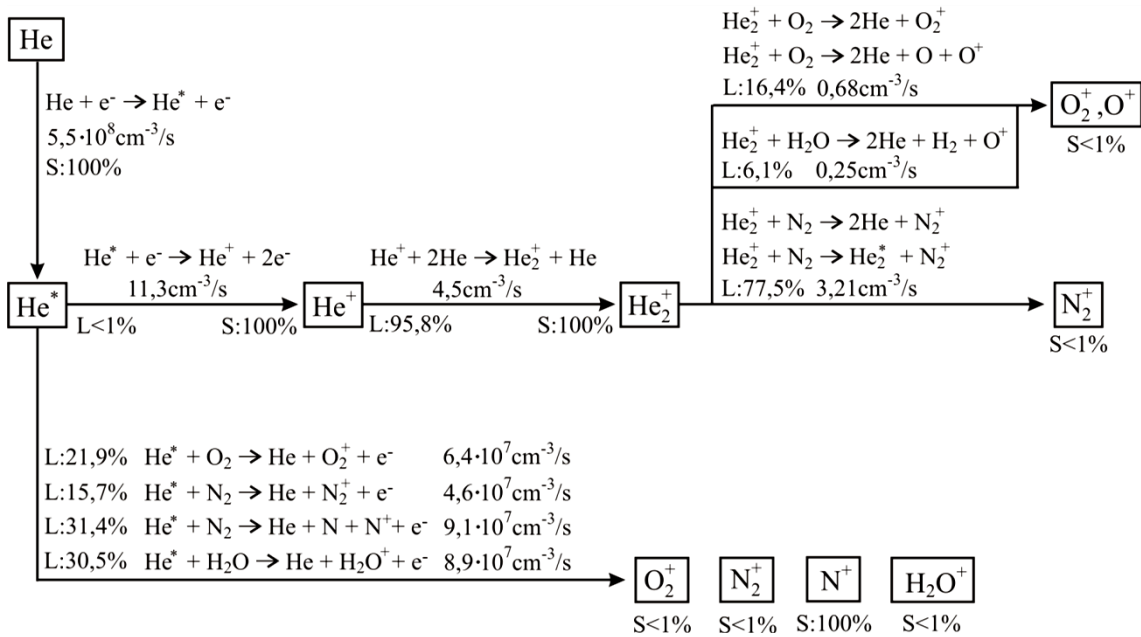
Joni helijuma inicijalno nastaju jonizacijom iz metastabilnog stanja (Slika 73), analogno sa rezultatima publikovanim u (Mladenović, Gocić, Marić, Petrović, 2018), u skladu sa činjenicom da presek ima okvirno za 20eV niži prag (Slika 51) i odgovarajući koeficijent brzine nekoliko redova veličine veću vrednost (npr. Slika 40a) oko 1eV za $1\mu\text{s}$ (Slika 72a). Pri većoj temperaturi elektrona od $4,19\text{eV}$ (Slika 72b) dominantnu ulogu u proizvodnji jona helijuma ipak preuzima jonizacija elektronskim udarom iz osnovnog stanja zbog veće vrednosti koeficijenta brzine ali i visoke koncentracije helijuma na 1atm ($2,45 \cdot 10^{19}\text{cm}^{-3}$), iako se prinos jonizacije metastabila povećava 9-10 redova veličine (Slika 74). U oba slučaja metastabili helijuma gase se u procesima Peningove jonizacije najzastupljenijih sastojaka smeše N_2 (7800ppm), O_2 (2100ppm) i H_2O (7600ppm), pri čemu se prinosi tih procesa povećavaju za 8-9 redova veličine sa porastom temperature elektrona kao posledica značajnog povećanja koeficijenta brzine za ekscitaciju helijuma. U proračunu za $1\mu\text{s}$ i za 5ms joni helijuma se konvertuju u jone He_2^+ u procesu na čiji prinos nelinearno utiče koncentracija helijuma ali koji se linearno menja sa koncentracijom jona He^+ . Za veće procenete vazduha (Slika 70) relativni prinos jona He^+ je približno isti zato što se manja proizvodnja usled niže koncentracije elektrona uravnotežava manjim gašenjem u procesu jonske konverzije.

Joni N_2^+ i O_2^+ inicijalno nastaju u jonizaciji molekula N_2 i O_2 elektronskim udarom (Slika 75), dok na višim energijama značajan doprinos u njihovoj proizvodnji preuzima i Peningova jonizacija usled višestruko pojačane proizvodnje metastabila He^* (pri čemu prinosi jonizacije elektronskim udarom porastu 4-5 redova veličine). Tokom dužih vremenskih intervala dolaze do izražaja i procesi jonske konverzije jona N_4^+ sa kiseonikom koji proizvode jone N_2^+ i O_2^+ . Joni N_4^+ nastaju jonskom konverzijom jona N_2^+ na čiji prinos bitno utiče koncentracija helijuma kao trećeg tela (Slika 76). Dok ovaj proces na svim srednjim energijama dominantno gasi jon N_2^+ , analogni proces u gašenju jona O_2^+ ima 1-2 reda veličine niži prinos zbog manje koncentracije kiseonika i manje vrednosti koeficijenta brzine. Glavni proces gašenja jona O_2^+ je proizvodnja hidrata

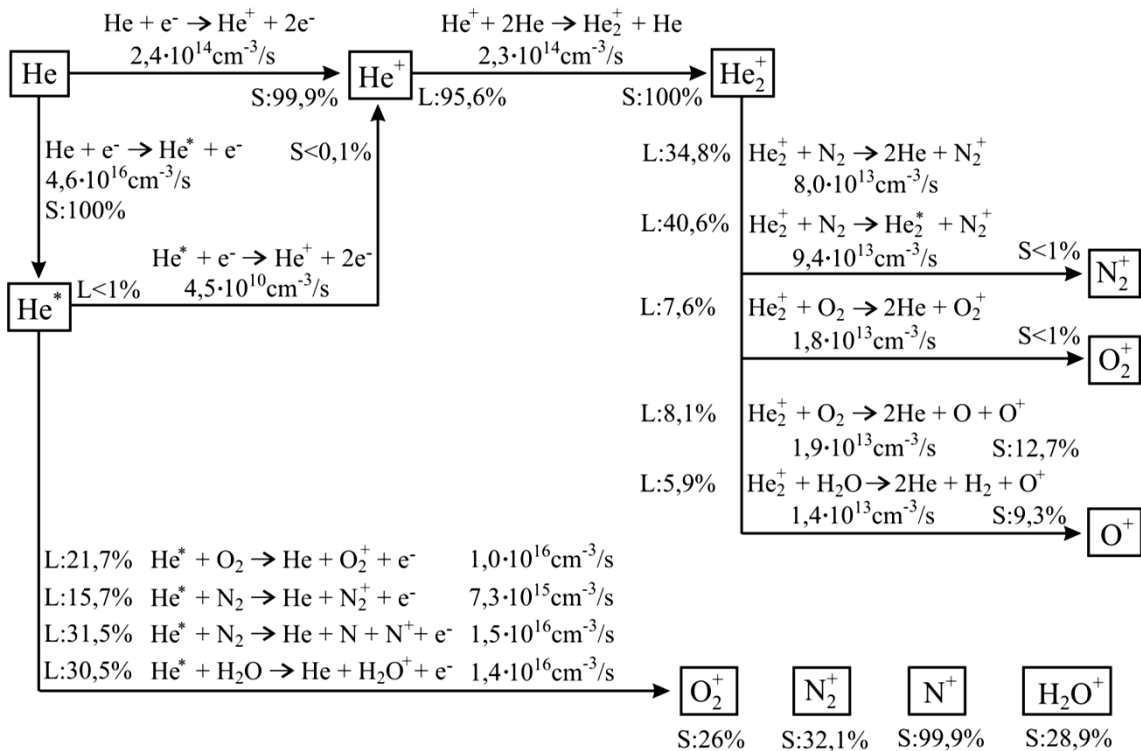
$O_2^+ \cdot H_2O$, određena koncentracijom helijuma i vodene pare. Ove razlike u procesima gašenja jona O_2^+ i N_2^+ objašnjavaju promene relativnih udela ovih jona sa promenom procenta vazduha prikazanih na Slici 70.

Jon O^+ inicijalno nastaje disocijativnom jonizacijom molekula O_2 (prag 17eV) kao što je prikazano na Slici 77. U proizvodnji jona O^+ na većoj temperaturi elektrona tokom 5ms uporediv prinos sa disocijativnom jonizacijom imaju i jonizacija atoma O (Peningova i elektronskim udarom), jonska konverzija He_2^+ sa O_2 , kao i proces konverzije jona N_4^+ sa atomima O. Disocijativna jonizacija molekula N_2 ima zanemarljiv prinos u proizvodnji jona N^+ zbog značajno višeg praga (24,34eV) u odnosu na disocijaciju molekula O_2 . Joni N^+ inicijalno nastaju disocijativnom Peningovom jonizacijom koja ima konstantan koeficijent brzine $1,0 \cdot 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$. Taj proces predstavlja glavni kanal proizvodnje jona N^+ i tokom 5ms, sa prinosom koji je veći 9 redova veličine zbog pojačane proizvodnje metastabila He^* na većim temperaturama elektrona. Joni O^+ i N^+ se na svim srednjim energijama u procesima sa N_2 , O_2 i H_2O prevode u jone NO^+ , N_3^+ i H_2O^+ (Slika 77 i 78). Prilikom tumačenja rezultata na Slici 70, treba imati u vidu da kiseonik i azot kao glavni sastojci vazduha bitno utiču na prinose proizvodnje jona O^+ i N^+ , međutim značajnije utiču na gašenje jona O^+ (Slika 78), dok kod jona N^+ oko 50% gašenja nosi proces sa H_2O .

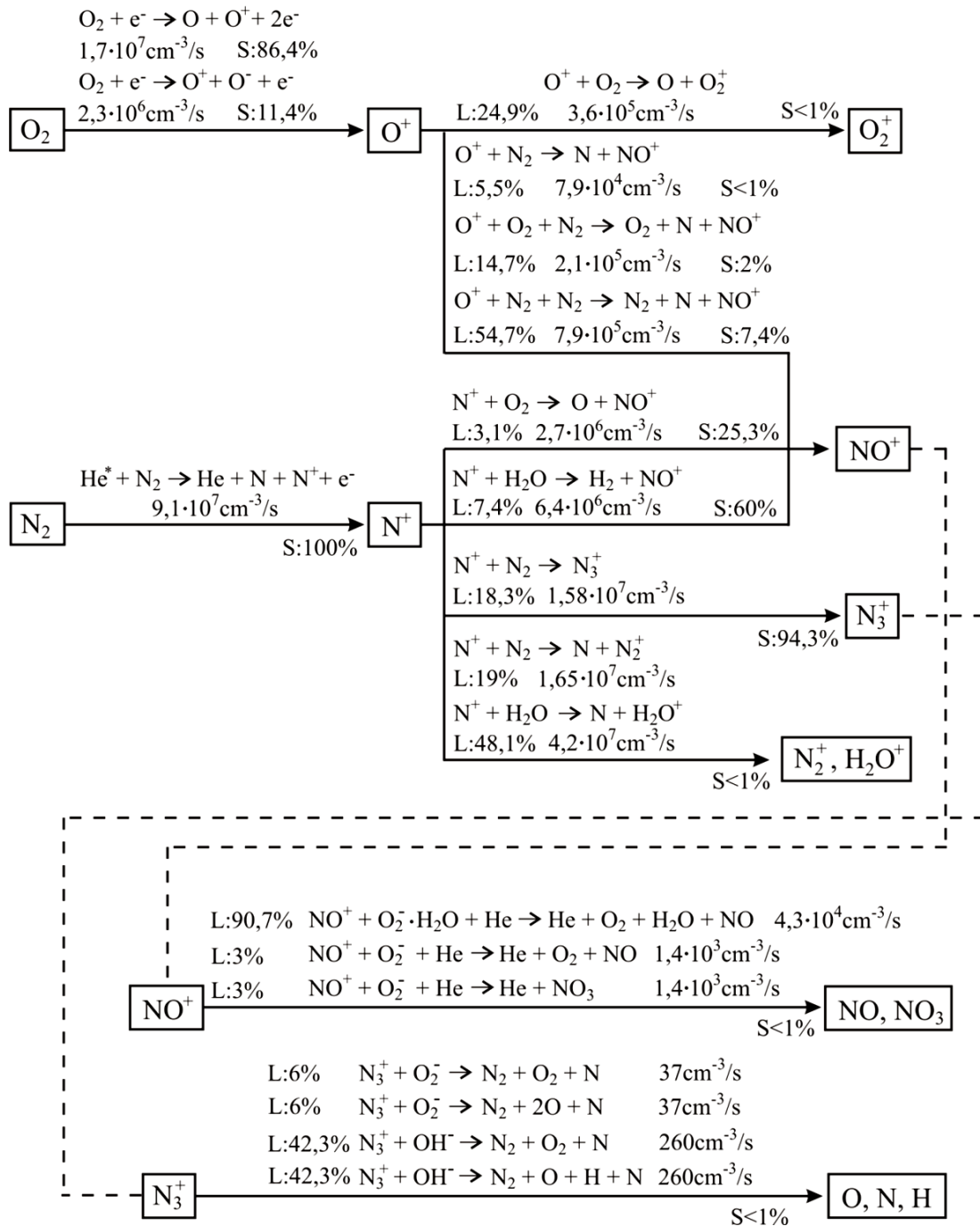
Joni H_2O^+ inicijalno nastaju jonizacijom molekula H_2O elektronskim udarom (Slika 79). Na većoj temperaturi elektrona tokom 5ms (Slika 80) prinos ovog procesa je veći za 5 redova veličine, a značajan doprinos u proizvodnji ima i Peningova jonizacija sa metastabilom He^* , kao i proces gašenja jona N^+ . Na nižim temperaturama gašenje jona H_2O^+ je određeno vodenom parom u glavnom procesu proizvodnje H_3O^+ jona. Pri većoj temperaturi elektrona tokom 5ms gašenje jona H_2O^+ je indirektno određeno vodenom parom kroz procese rekombinacije sa jonima H^- i OH^- koji nastaju u zahvatu elektrona na molekulima H_2O (Slika 80, 81 i 82). Dinamička ravnoteža između procesa proizvodnje i gašenja jona H_2O^+ postiže se nakon 15ms (Slika 69). Jon H_3O^+ se efikasno gasi na svim energijama u procesu proizvodnje hidrata $H_3O^+ \cdot H_2O$ na čiji prinos utiču vodena para i helijum kao dominantno treće telo. Procenat vazduha ne utiče bitno na relativne prinose ovih jona (Slika 70).



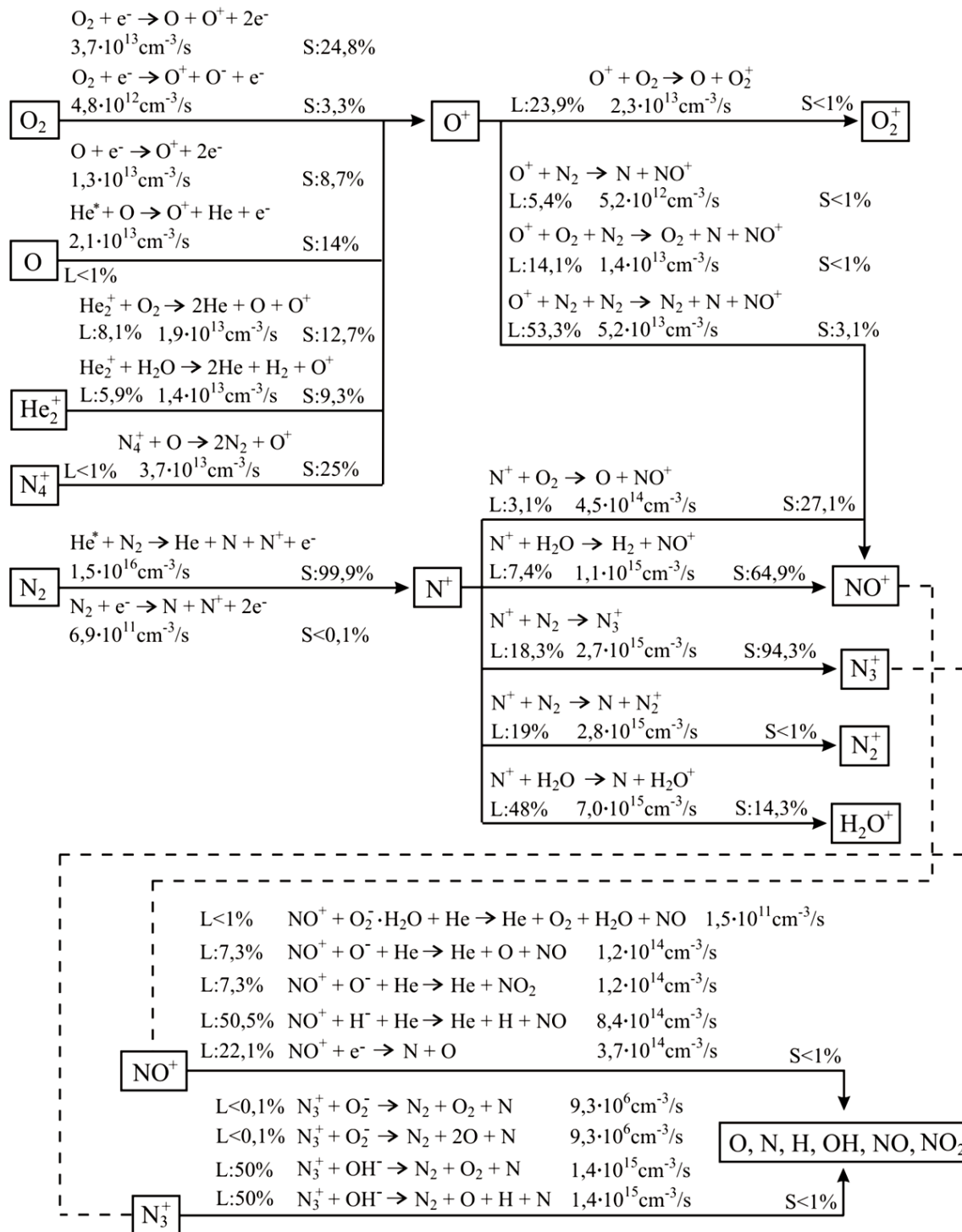
Slika 73. Glavni kanali za He^* , He^+ i He_2^+ tokom prve mikrosekunde.



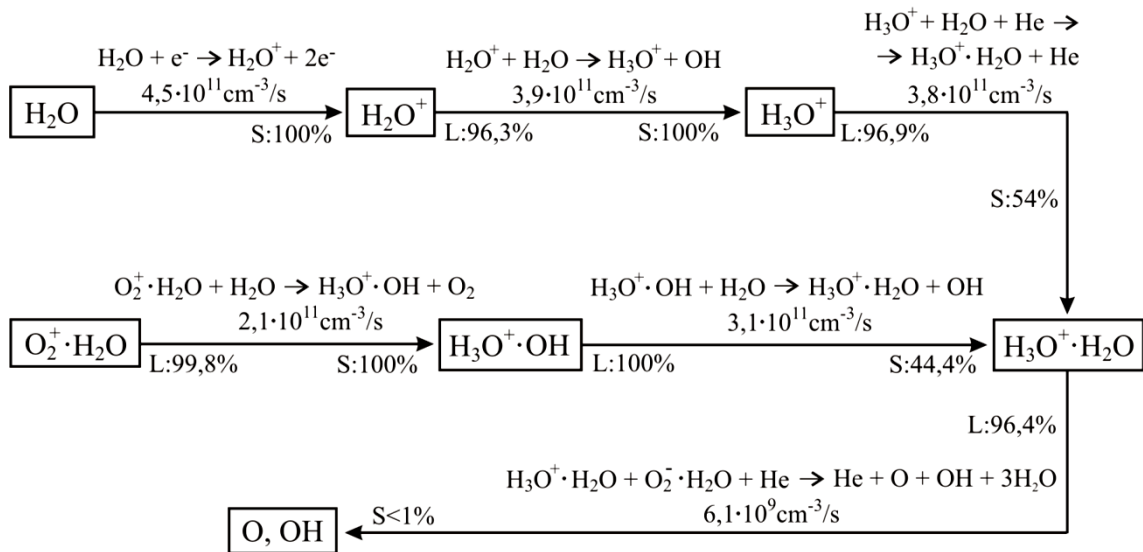
Slika 74. Glavni kanali za He^* , He^+ i He_2^+ nakon 5ms.



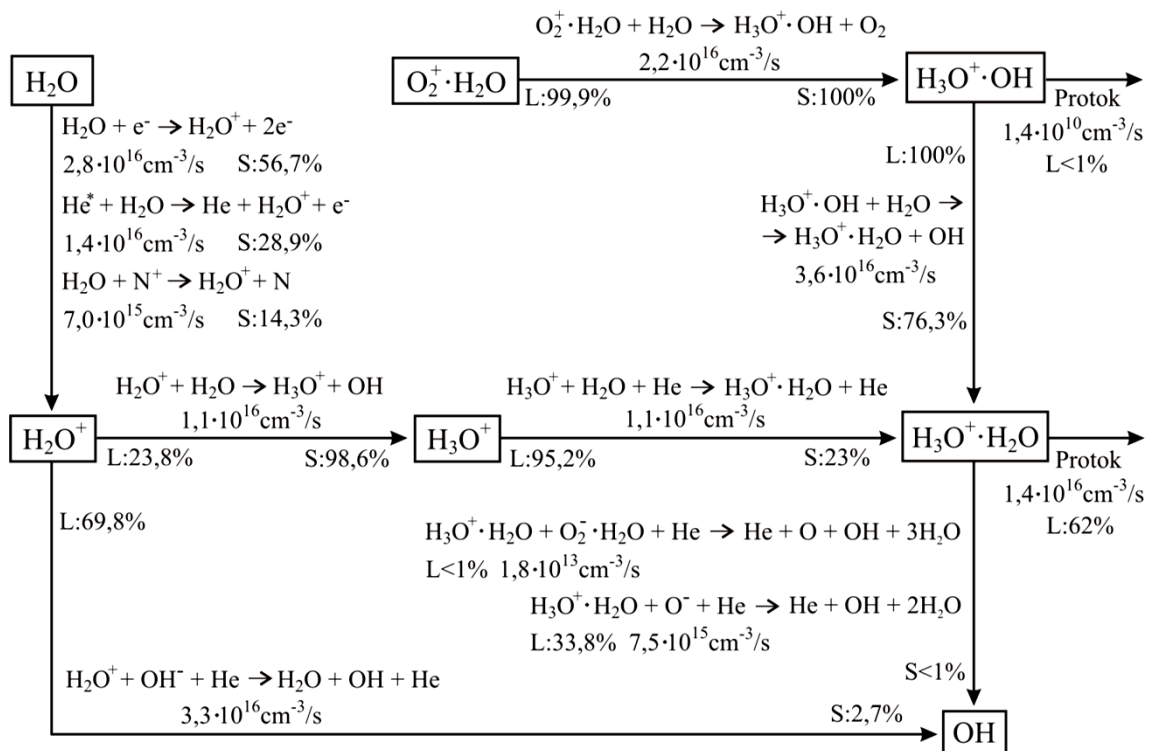
Slika 77. Glavni kanali za O⁺, N⁺, NO⁺ i N₃⁺ tokom prve mikrosekunde.



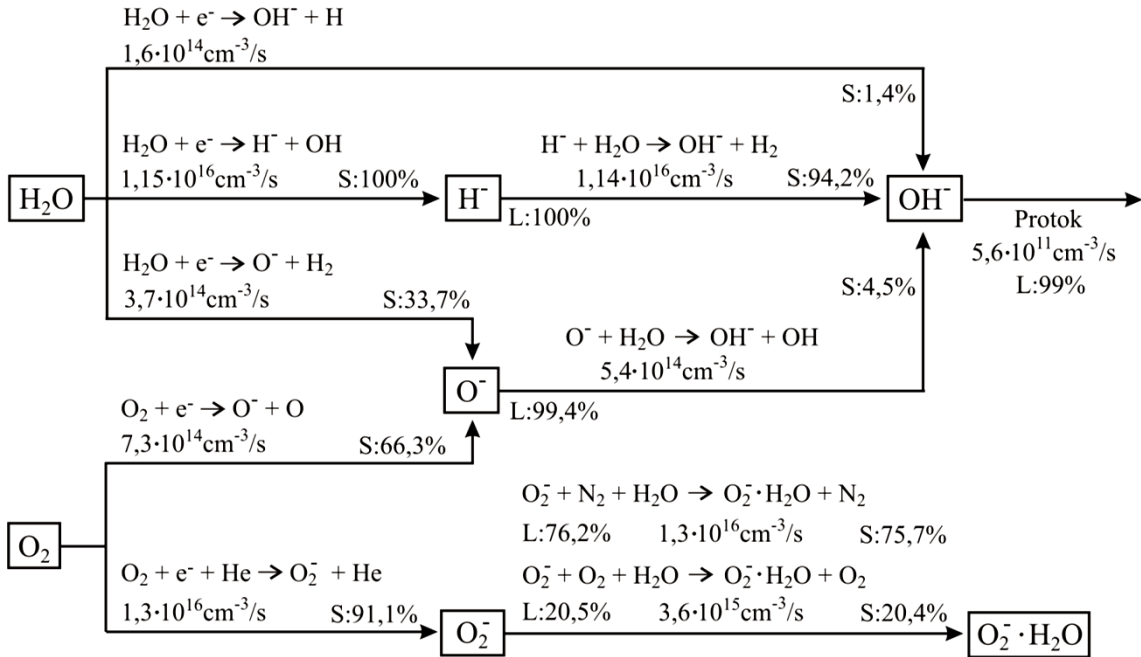
Slika 78. Glavni kanali za O^+ , N^+ , NO^+ i N_3^+ nakon 5ms.



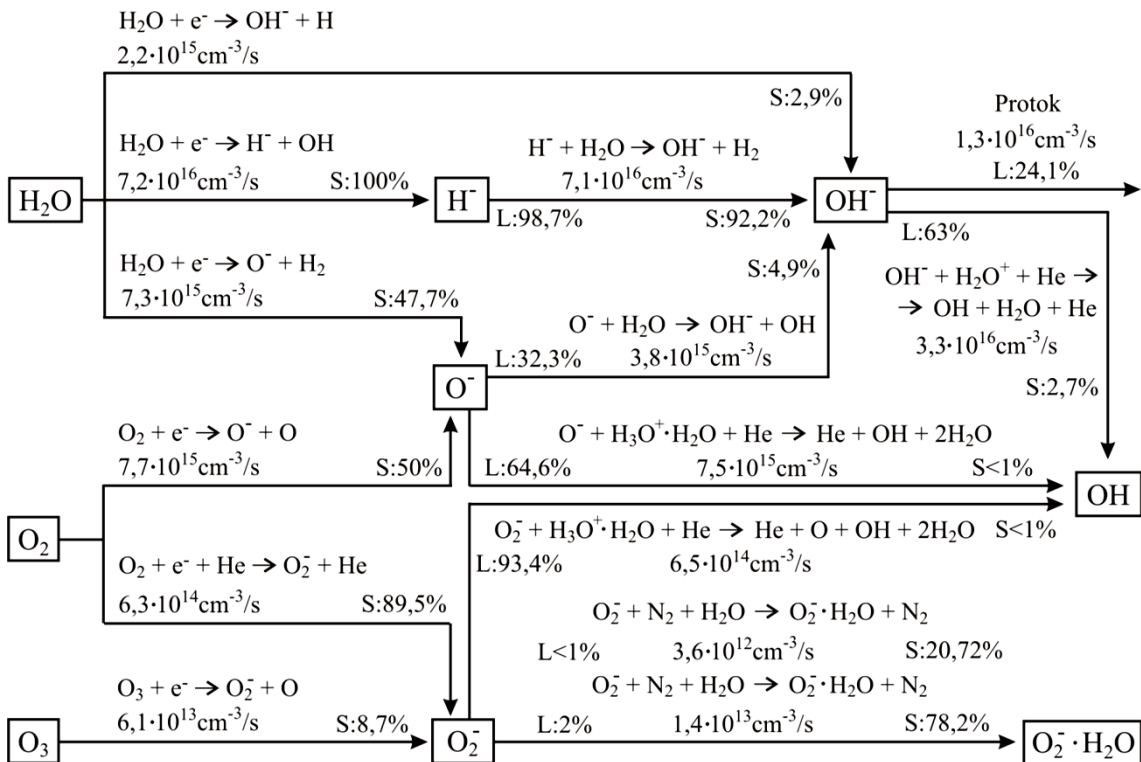
Slika 79. Glavni kanali za H_2O^+ , H_3O^+ i njihove hidrate tokom prve mikrosekunde.



Slika 80. Glavni kanali za H_2O^+ , H_3O^+ i njihove hidrate nakon 5ms.



Slika 81. Glavni kanali za jone H^- , OH^- , O^- i O_2^- tokom prve mikrosekunde.



Slika 82. Glavni kanali za jone H^- , OH^- , O^- i O_2^- nakon 5ms.

9.8 Uticaj vodene pare na koncentraciju i temperaturu elektrona

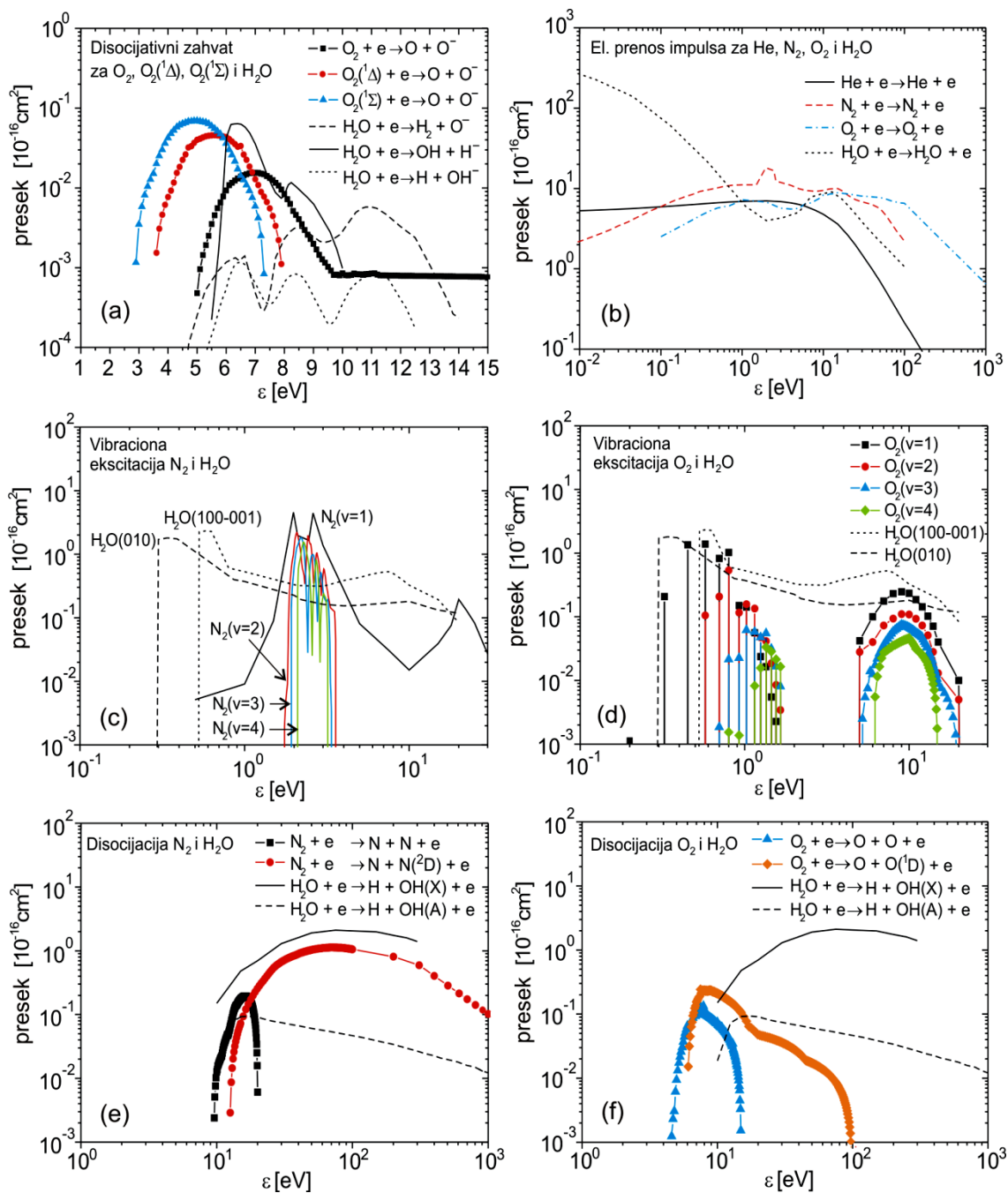
Vodena para predstavlja elektronegativni gas. Pored toga, za molekule H_2O postoje procesi vibracione ekscitacije u modove (100-001) i (010), kao i procesi disocijacije u stanja $OH(X)$ i $OH(A)$, čiji su preseki uporedivi sa odgovarajućim presecima kod molekula N_2 i O_2 . Odatle sledi da vodena para može imati uticaj na koncentraciju i temperaturu elektrona. Poređenje preseka za rasejanje elektrona na molekulu H_2O sa odgovarajućim presecima za He , N_2 , O_2 i H_2O (sa Slika 51-56) prikazano je na Slikama 83a-f).

Presek za disocijativni zahvat elektrona na molekulu H_2O u kome nastaju joni H ima skoro red veličine veću vrednost u odnosu na odgovarajući presek kod O_2 (Slika 83a), što ukazuje da će vodena para imati izražen uticaj na koncentraciju elektrona u niskotemperaturnim plazmama čak i kada je njena koncentracija u smeši manja od koncentracije kiseonika. Vrednost ovog preseka je uporediva sa veličinom preseka za zahvat elektrona na pobuđenim molekulima $O_2(^1\Delta)$ i $O_2(^1\Sigma)$, koji pak imaju niži energijski prag, ali uticaj $O_2(^1\Delta)$ i $O_2(^1\Sigma)$ na koncentraciju elektrona će značajno zavisiti od odgovarajuće naseljenosti ovih stanja. Treba imati u vidu da uticaj pojedinih vrsta na elektronegativnost plazme zavisi i od temperature elektrona, obzirom da je na nižim energijama od 1eV dominantan proces nedisocijativni tročestični zahvat kod O_2 , čiji je presek prikazan na Slici 54.

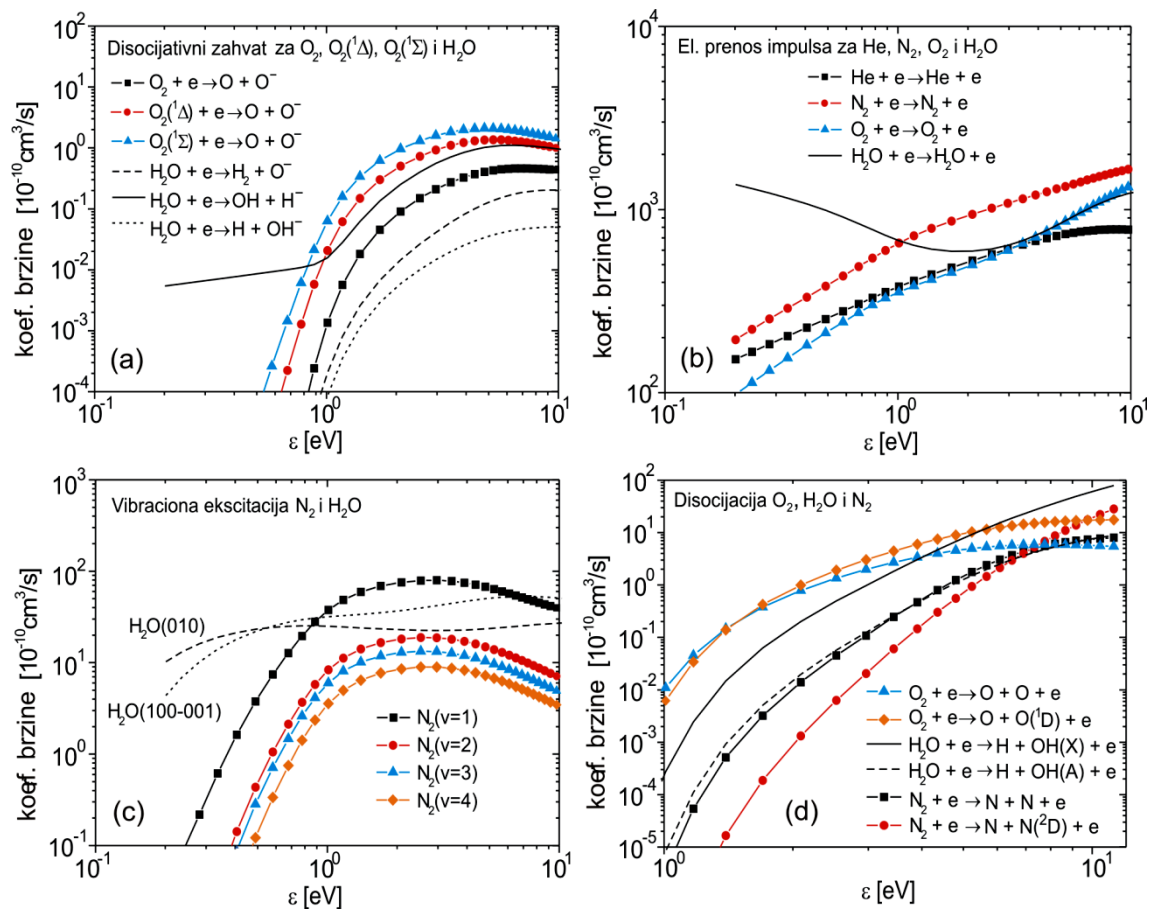
Na Slici 65. prikazan je uticaj vodene pare na EEDF, dok Slika 84a-d) prikazuje koeficijente brzine izračunate pomoću programa BOLSIG+ za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare, za procese čiji su preseki poređeni na Slici 83a-f). U cilju proračuna koeficijenata brzine za sve preostale elektronske procese iz Tabele 13. (Prilog 1), uključeni su preseki za vrste O (50 ppm), N (40 ppm), O_3 (6 ppm), NO (50 ppm), NO_2 (150 ppm), He^* (10^{-6} ppm), $O_2(^1\Delta)$ (30 ppm), $O_2(^1\Sigma)$ (1 ppm), $O(^1D)$ (10^{-2} ppm) i $N(^2D)$ (0.2 ppm). Molski udeli ovih vrsta određeni su na osnovu rezultata globalnog modela, odnosno proračunatog sastava smeše nakon 10ms. Svi preseki za ove vrste prikazani su na Slikama 51-60.

Koeficijenti brzine za disocijativni zahvat elektrona imaju najveću vrednost za $O_2(^1\Delta)$ i $O_2(^1\Sigma)$ (Slika 84a). Koeficijent za zahvat $H_2O + e \rightarrow OH + H$ ima približno za 10% nižu vrednost ali veću od koeficijenta za disocijativni zahvat kod O_2 . Kako je

koncentracija vodene pare u smeši skoro 4 puta veća od koncentracije O_2 i oko 2 reda veličine od koncentracije $O_2(^1\Delta)$ i $O_2(^1\Sigma)$, može se zaključiti da će H_2O dominantno određivati elektronegativnost plazme na većim temperaturama elektrona.



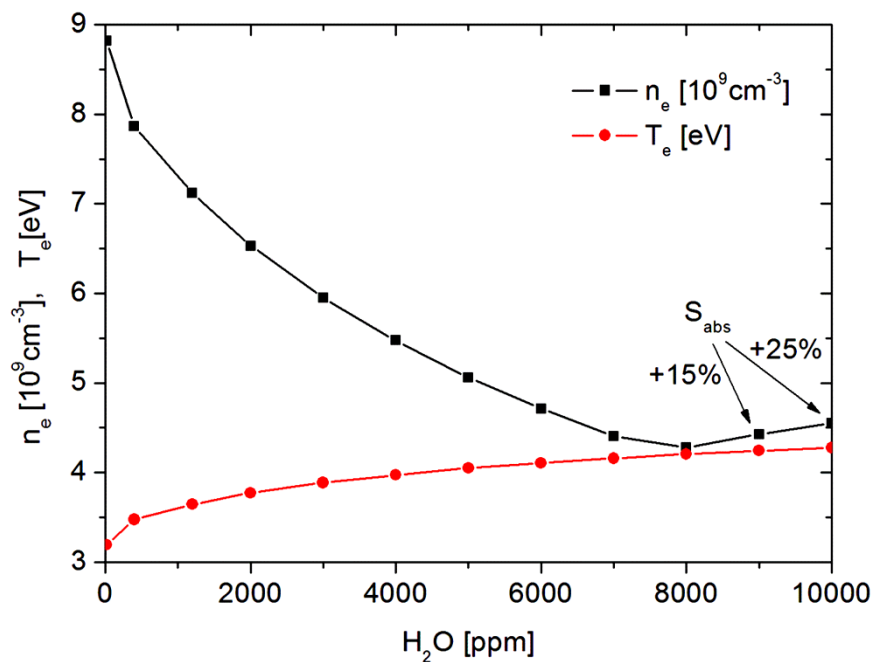
Slika 83. Poređenje preseka najvažnijih elektronskih procesa: zahvat kod H_2O i O_2 a), el. prenos impulsa kod He, N_2 , O_2 , H_2O b), vibraciona ekscitacija H_2O i N_2 c), odnosno O_2 d), disocijacija H_2O i N_2 e), odnosno O_2 .



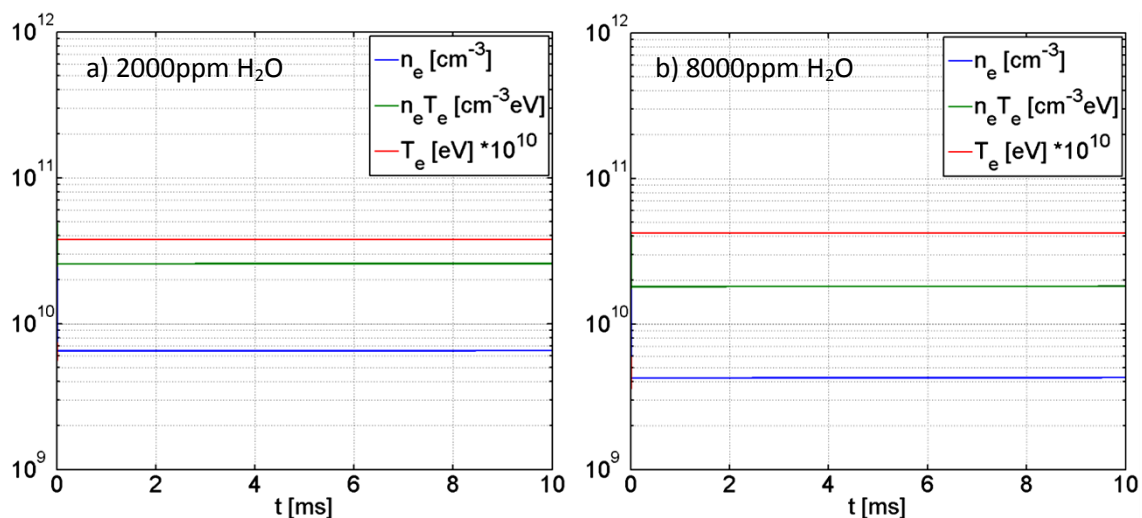
Slika 84. Poređenje koeficijena brzine za: disocijativni zahvat elektrona na molekulu O_2 , $\text{O}_2(^1\Delta)$, $\text{O}_2(^1\Sigma)$ i H_2O a), elastični prenos impulsa za He, N_2 , O_2 i H_2O b), vibracionu ekscitaciju molekula N_2 i H_2O c) i vibracionu ekscitaciju molekula O_2 i H_2O d). Svi koeficijenti brzine izračunati za uslove 1% vazduha i 7600ppm H_2O .

Koeficijenti brzine za elastični prenos impulsa imaju bliske vrednosti za He, N_2 , O_2 i H_2O iznad 1eV, što znači da će na odnos kolizionih frekvencija ovih procesa prevashodno uticati sastav smeše. Sa Slike 84c) sledi da vibraciona ekscitacija molekula H_2O , posebno u stanje $\text{H}_2\text{O}(100-001)$, može imati izraženiji uticaj na srednju energiju elektrona u odnosu na vibracione ekscitacije molekula N_2 u zavisnosti od sastava smeše. Konačno, sa Slike 84d) može se zaključiti da su najizraženiji procesi disocijacije kod molekula H_2O i O_2 , dok su kod molekula N_2 koeficijenti brzine manji. Pored uticaja na energiju elektrona, procesi disocijacije su važni kao inicijalni procesi nastanka važnih RONS, O, $\text{O}(^1\text{D})$, $\text{O}(^1\text{S})$, $\text{OH}(X)$, $\text{N}(^2\text{D})$, $\text{N}(^2\text{P})$ kao što je prikazano u Odeljku 9.11.

Na Slici 85. prikazana je promena koncentracije i temperature elektrona na osnovu modela za različite udele vodene pare nakon 10ms, a na Slikama 86a-b) rezultati proračuna tokom 10ms za 2000ppm i 8000ppm H₂O. Povećanjem udela vodene pare smanjuje se koncentracija elektrona usled zahvata što dovodi do povećanja temperature, pri čemu se srednja energija svih elektrona $n_e T_e$ smanjuje zbog većih gubitaka na vibracione ekscitacije i disocijaciju molekula H₂O (Slika 86a,b).



Slika 85. Koncentracija i temperatura elektrona za različite udele vodene pare.



Slika 86. Koncentracija i temperatura elektrona tokom 10ms na osnovu globalnog modela za 2000ppm H₂O a) i 8000ppm H₂O b).

Slična zavisnost n_e i T_e od udela H_2O za mikro-mlaz u helijumu na atmosferskom pritisku je prezentovana u (Schröter et al, 2018b), ali sa većom koncentracijom elektrona reda $10^{10}cm^{-3}$ zbog niske koncentracije kiseonika u smeši (2-7ppm O_2) i veće gustine snage ($10-18Wcm^{-3}$). Obzirom da su rezultati na Slikama 85-86. dobijeni za gustinu snage $4,9Wcm^{-3}$ i 1% vazduha, čak i za 20ppm H_2O zbog velikog udela kiseonika u smeši (2100ppm O_2) koncentracija elektrona se u prvih nekoliko mikrosekundi smanjuje sa inicijalne vrednosti $10^{11}cm^{-3}$ ispod $10^{10}cm^{-3}$ usled tročestičnog i disocijativnog zahvata. Za slučaj kapacitivno spregnutog pražnjenja na atmosferskom pritisku (Sun et al., 2019a) prezentovani su slični rezultati sa uticajem kiseonika na parametre plazme. Za 10000ppm vazduha dobijene su vrednosti koncentracije i temperature elektrona približno $1,0 \cdot 10^{10}cm^{-3}$ i 2,7eV, ali bez uključenja vodene pare u smeši. U radu (Sun et al., 2019b) analiziran je uticaj vodene pare na sastav plazme za slučaj RF pražnjenja na atmosferskom pritisku i na osnovu publikovanih rezultata sledi da se pri povećanju udela H_2O od 10ppm do 10000ppm koncentracija elektrona smanjuje od $6,6 \cdot 10^{10}cm^{-3}$ do $6,3 \cdot 10^9cm^{-3}$, ali sa samo 0,1% vazduha u smeši.

Na osnovu rezultata globalnog modela sa Slike 85, preseka i koeficijenata brzine prezentovanim na Slikama 83. i 84, može se zaključiti da prisustvo vodene pare bitno utiče na elektronegativnost plazme, što dovodi do daljeg smanjenja koncentracije elektrona ispod $10^{10}cm^{-3}$ i povećanja temperature iznad 3eV. Za udeo vodene pare veći od 8000ppm vrednost gustine apsorbovane snage u proračunu se mora uvećati za 25% u skladu sa procenjenim intervalom (105), što znači da su gubici elektrona u procesima zahvata izraženi u tolikoj meri da zahtevaju veću snagu za održavanje pražnjenja.

Na Slikama 87a-b) poređeni su procentualni doprinosi za zahvate elektrona na molekulima O_2 , $O_2(^1\Delta)$ i H_2O za 1200ppm H_2O i 7600ppm H_2O , izračunati za 1% vazduha i vremenski interval 5ms. Može se zaključiti da čak i u slučaju kada je udeo vodene pare približno duplo manji u odnosu na udeo kiseonika elektroni se u najvećoj meri gube u disocijativnim zahvatima na molekulima H_2O (Slika 87a). Pri tom, najznačajniji proces zahvata proizvodi H^- jone:

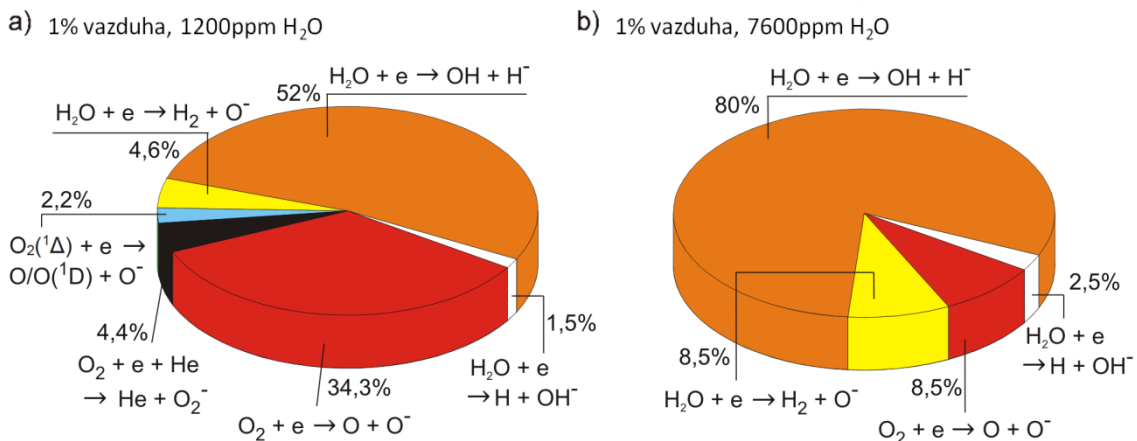


koji se efikasno prevode u OH^- takođe uz učešće vodene pare (Slike 81-82):



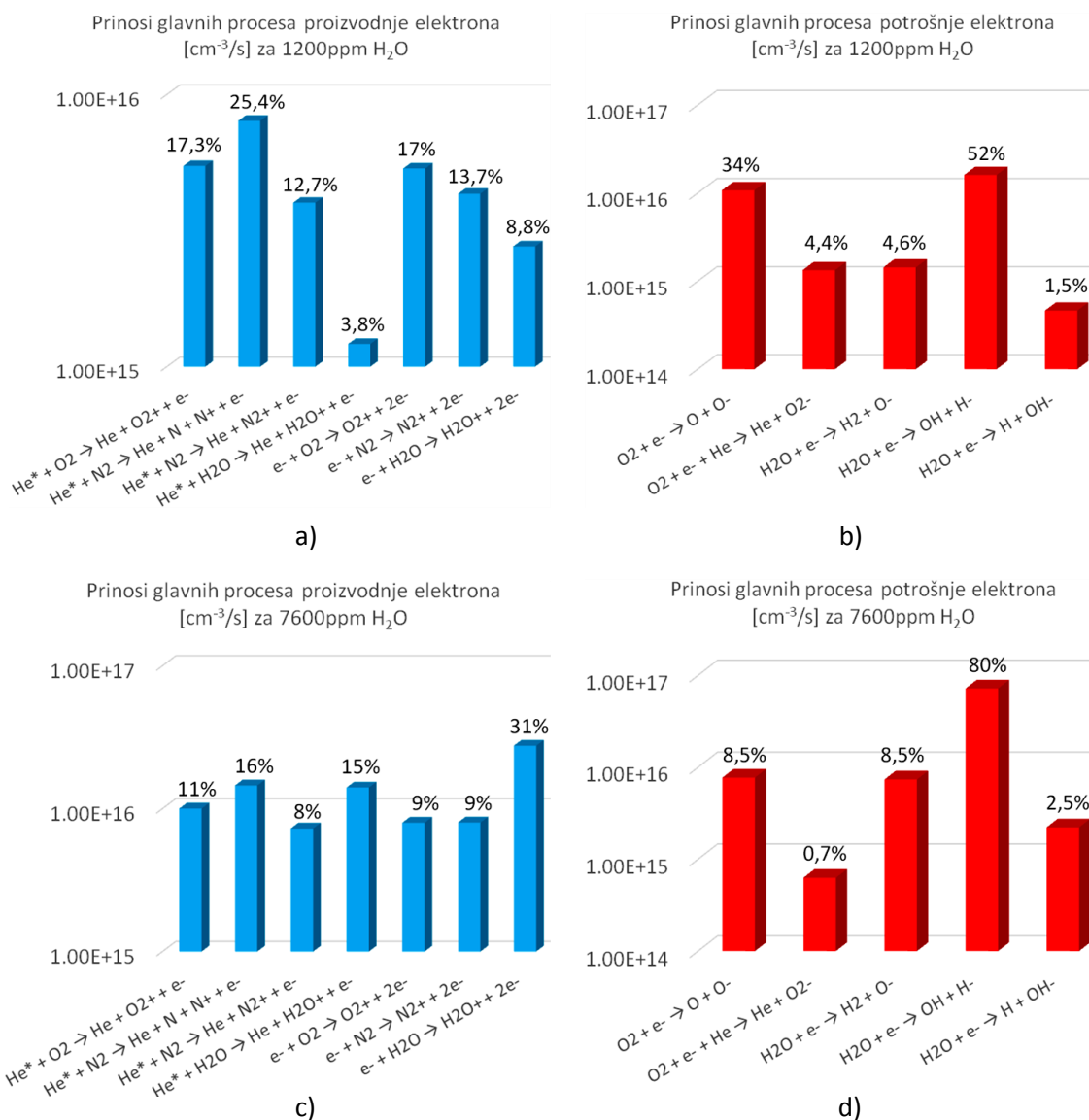
Prinos zahvata (107) za 1200ppm H_2O iznosi $1,6 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}/\text{s}$ čemu odgovara više od 50% doprinosa u gubitku elektrona, dok 34% odgovara disocijativnom zahvatu kod O_2 ($1,1 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}/\text{s}$). Ovakav odnos između vodene pare i kiseonika u uticaju na elektronegativnost plazme je u skladu sa odnosom odgovarajućih preseka (Slika 83a) odnosno koeficijenata brzine (Slika 84a). Doprinost tročestičnog zahvata je 4,4% čak i sa helijumom kao trećim telom usled relativno visoke srednje energije elektrona 3,7eV (Slika 85) na kojoj dominiraju disocijativni zahvati.

Pri povećanju udela vodene pare (Slika 87b) prinos zahvata (107) ima skoro 5 puta veću vrednost $7,6 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}/\text{s}$ čemu odgovara čak 80% doprinosa u totalnoj potrošnji elektrona. Kako se radi o elektronskom procesu, treba imati u vidu da pored veće koncentracije H_2O na prinos ovog procesa utiču promene u koncentraciji elektrona (Slika 85), kao i promene koeficijenta brzine sa temperaturom elektrona (Slika 84a). U ovom slučaju disocijativni zahvat kod O_2 ima manji prinos $7,7 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}/\text{s}$ zbog konstantne koncentracije kiseonika i niže koncentracije elektrona, čemu odgovara manje od 10% doprinosa u totalnoj potrošnji elektrona. Takođe, na proizvodnju O^- jona (Slika 82) pored ovog procesa sa uporedivim prinosom ($7,3 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}/\text{s}$, 48%) utiče i zahvat:



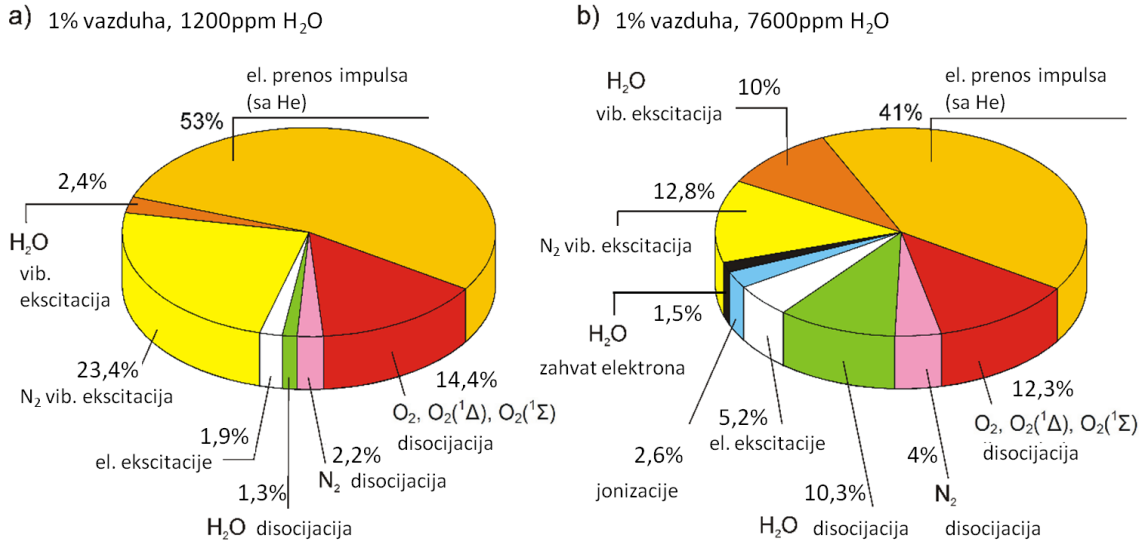
Slika 87. Procentualni doprinosi zahvata elektrona na molekulima O_2 , $\text{O}_2(^1\Delta)$ i H_2O za 1% vazduha, 1200ppm H_2O a) i 7600ppm H_2O b).

Pored gubitaka, vodena para utiče i na proizvodnju elektrona preko jonizacije elektronskim udarom (13,5eV) i Peningove jonizacije molekula H₂O metastabilom He^{*}. Obzirom da se radi o procesima sa visokim pragom, koeficijenti brzine a time i prinosi tih procesa zavise od varijacija temperature i koncentracije elektrona prikazanih na Slici 85. Dakle, za svaku vrednost udela vodene pare dolazi do uspostavljanja dinamičke ravnoteže između visokoenergijskih procesa jonizacije i niskoenergijskih procesa zahvata. Slike 88a-b) prikazuju apsolutne prinose glavnih procesa proizvodnje i potrošnje elektrona za 1200ppm H₂O a Slike 88c-d) za 7600ppm H₂O.



Slika 88. Prinosi jonizacije i zahvata za 1200ppm H₂O a,b) i 7600ppm H₂O c,d).

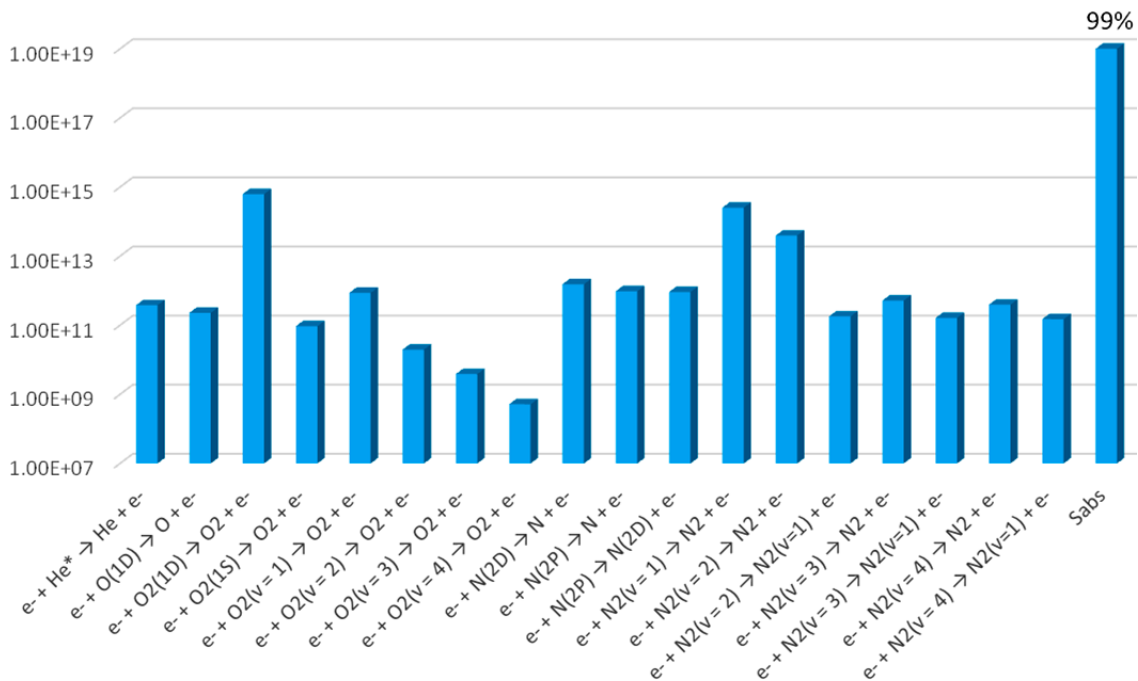
Vodena para bitno utiče na srednju energiju elektrona preko vibracionih ekscitacija i disocijacija u stanja OH(X) i OH(A), važne procese proizvodnje OH radikala. Na Slici 89a-b) prikazani su procentualni doprinosi glavnih procesa gubitaka srednje energije svih elektrona $n_e T_e$ [$\text{cm}^{-3} \text{eV}$] za 1% vazduha, 1200ppm i 7600ppm H_2O .



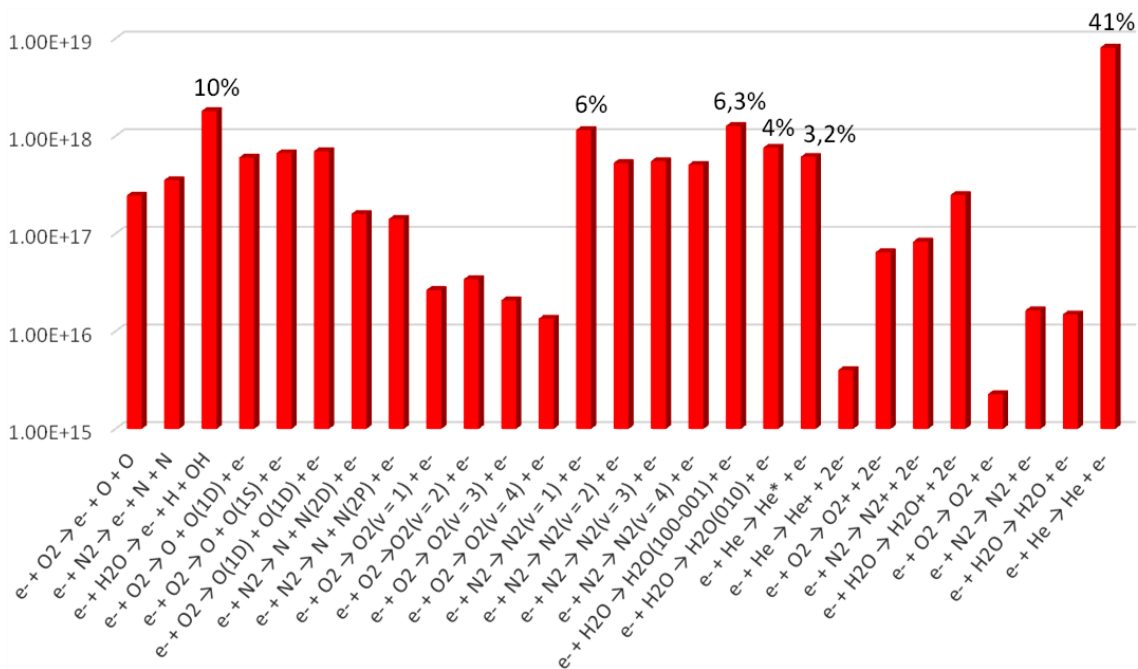
Slika 89. Procentualni doprinosi glavnih procesa gubitaka energije elektrona za 1% vazduha, 1200ppm H_2O a) i 7600ppm H_2O b).

Za sve udele H_2O elektroni dominantno dobijaju energiju od električnog polja, odnosno u jednačini (101) član $2S_{abs}/3e$ sa konstantnim prinosom reda $10^{19} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1} \text{eV}$ doprinosi sa 99,9% proizvodnji energije elektrona (Slika 90a). Takođe, u oba slučaja procesi elastičnog rasejanja, koji su zbog efekata analiziranih u Poglavlju 5 uračunati u jednačini (101) preko preseka i koeficijenta brzine za elastični prenos impulsa (Slika 84b), imaju najveći procentualni doprinos u potrošnji energije elektrona. To se pre svega odnosi na rasejanje elektrona na atomima helijuma iz nekoliko razloga. Koeficijent brzine na energijama iznad 3eV ima skoro red veličine 10^{-8} . Koncentracija helijuma u smeši je reda 10^{19}cm^{-3} , dok je za N_2 , O_2 i H_2O reda 10^{17}cm^{-3} (reda 1000ppm). Atomi helijuma imaju manju masu u odnosu na molekule N_2 , O_2 i H_2O i faktor koji određuje energiju koju elektroni predaju čestici meti u formi kinetičke prilikom elastičnog rasejanja iznosi $2m_e/M_{He} \cong 1,36 \cdot 10^{-4}$, dok je za N_2 , O_2 i H_2O reda 10^{-5} . Na potrošnju energije elektrona bitno utiču i neelastični procesi sa nižim

pragom, poput vibracionih ekscitacija i disocijacija molekula O₂, N₂, ali i H₂O pri većim udelima vodene pare (Slika 89b). Prinosi najznačajnijih procesa u kojima elektroni dobijaju i gube energiju za 1% vazduha i 7600ppm H₂O prikazani su na Slikama 90a-b).



a)

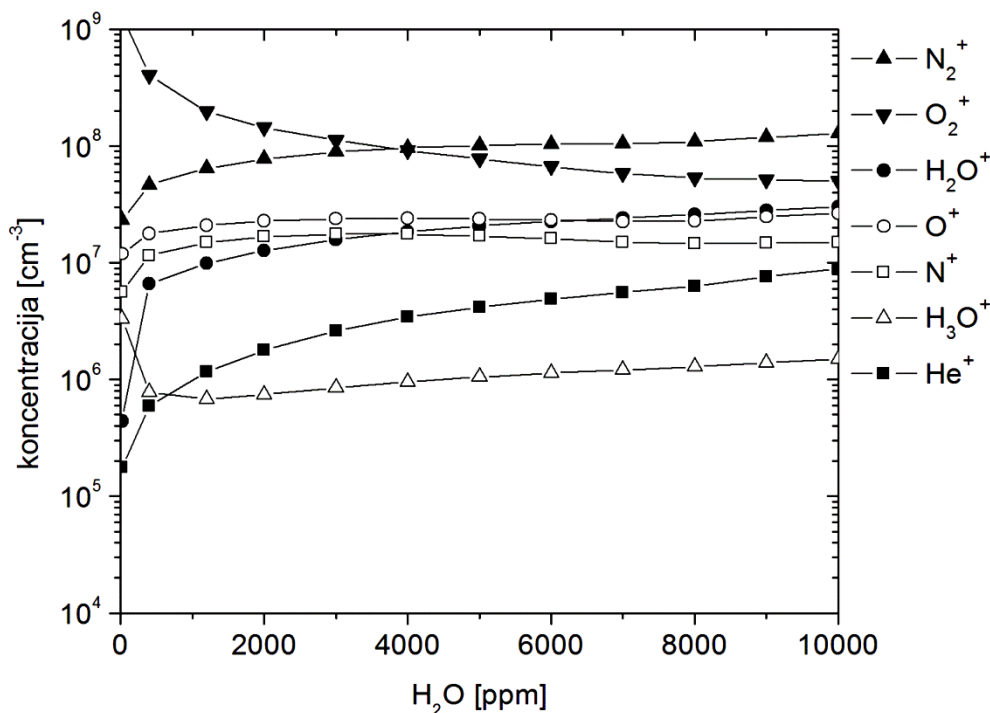


b)

Slika 90. Apsolutni prinosi najvažnijih procesa [cm⁻³s⁻¹eV] u proizvodnji a) i potrošnji ukupne energije elektrona b) za 1% vazduha i 7600ppm H₂O.

9.9 Uticaj vodene pare na hemijski sastav plazme

U cilju analize uticaja koncentracije vodene pare kao važnog parametra na hemijski sastav plazme, izvršen je proračun na osnovu globalnog modela za 1% vazduha i različite udele vodene pare od 20ppm do 10000ppm. Na Slici 91. prikazane su koncentracije pozitivnih jona nakon 10ms. Najbolje slaganje sa masenim spektrom jona (Slika 68) dobija se za 7600ppm H_2O , dok za širi interval vrednosti zbog promena apsolutnih vrednosti izračunatih koncentracija relativni prinosi jona pokazuju značajno odstupanje u odnosu na merene vrednosti. U Odeljku 9.11 slede rezultati koji pokazuju kako koncentracija vodene pare utiče na koncentracije i hemijsku kinetiku preostalih vrsta, negativnih jona i RONS.



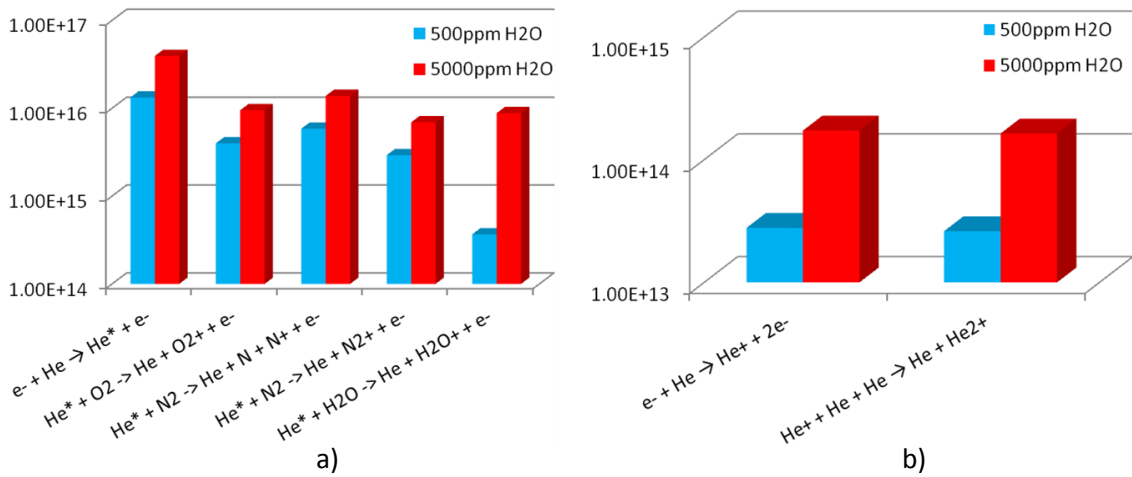
Slika 91. Koncentracije pozitivnih jona izračunate na osnovu globalnog modela nakon 10ms za 1% vazduha i različite udele vodene pare.

U cilju tumačenja rezultata prikazanih na Slici 91, treba imati u vidu rezultate koji prezentuju uticaj vodene pare na koncentraciju i temperaturu elektrona (Slika 85), a zatim glavne kanale proizvodnje i gašenja jona prikazane na Slikama 73-80.

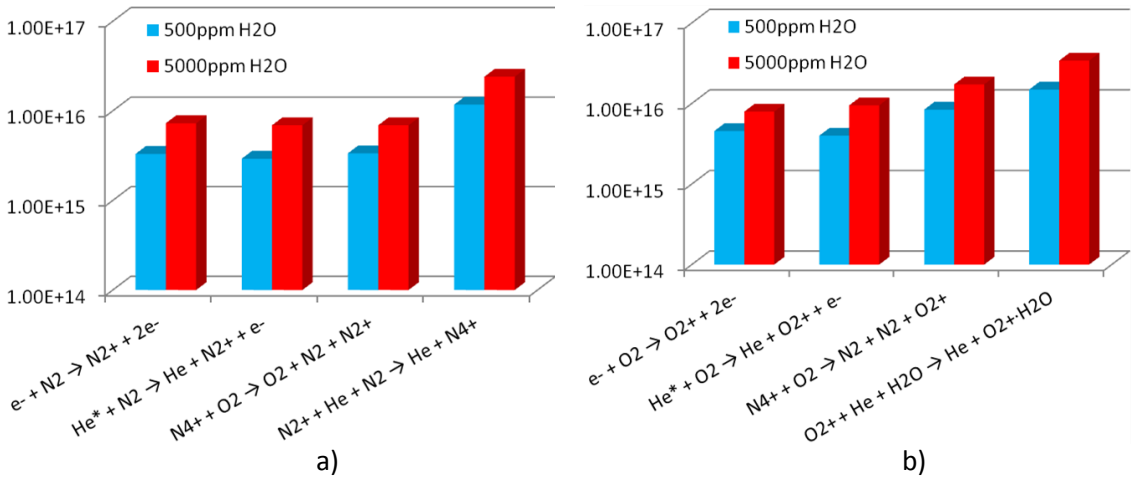
Kod jona He^+ i N_2^+ , koji dominantno nastaju u procesima jonizacije elektronskim udarom i Peningove jonizacije, a gase se u procesima jonske konverzije u He_2^+ i N_4^+ koji ne uključuju H_2O , pri povećanju udela vodene pare u smeši dolazi do povećanja koncentracije prevashodno zbog porasta temperature elektrona. Prinosi gašenja linearno prate porast koncentracije jona, ali na prinose jonizacija izraženiji uticaj ima porast odgovarajućih koeficijenata brzine sa temperaturom elektrona (Slika 92a,b i 93a). Koncentracija jona O_2^+ opada na većim udelima vodene pare zbog proizvodnje hidrata (Slika 93b). Kod jona O^+ za svaki udeo H_2O uspostavlja se dinamička ravnoteža između proizvodnje u jonizaciji i jonskih konverzija čiji prinosi linearno prate promenu koncentracije (Slika 94). Na gašenje jona N^+ značajno utiče prenos naelektrisanja sa molekulima H_2O i N_2 (Slika 95).

Joni H_2O^+ u najvećoj meri nastaju jonizacijom molekula H_2O elektronskim udarom i Peningovom jonizacijom sa metastabilom He^* , čiji se prinosi linearno menjaju sa koncentracijom vodene pare ali značajno rastu sa povećanjem temperature elektrona zbog odgovarajućih koeficijenata brzine. Gašenje ovih jona je određeno rekombinacijom sa jonima OH^- uz helijum kao treće telo (Slika 80) i procesom konverzije $\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$ čiji se prinos nelinearno povećava sa koncentracijom vodene pare (Slika 96a). Vrednosti koeficijenata brzine za zahvat elektrona se ne menjaju značajno sa temperaturom elektrona iznad 3,5eV (Slika 84a) i proizvodnja jona OH^- se povećava sa koncentracijom vodene pare. Međutim, iznad 1000ppm H_2O prinos konverzije u jone H_3O^+ izrazito raste i ovaj proces stabilizuje porast koncentracije jona H_2O^+ . Takođe, on spreže kinetiku jona H_2O^+ i H_3O^+ kao dominantni proces proizvodnje H_3O^+ za sve udele H_2O . Glavni proces gašenja jona H_3O^+ predstavlja proizvodnja klastera $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$. Pri većim udelima vodene pare dolazi do blagog porasta koncentracija H_2O^+ i H_3O^+ na kojima nastupa dinamička ravnoteža između procesa proizvodnje i gašenja čiji se prinosi nelinearno menjaju sa koncentracijom H_2O (Slika 96a,b).

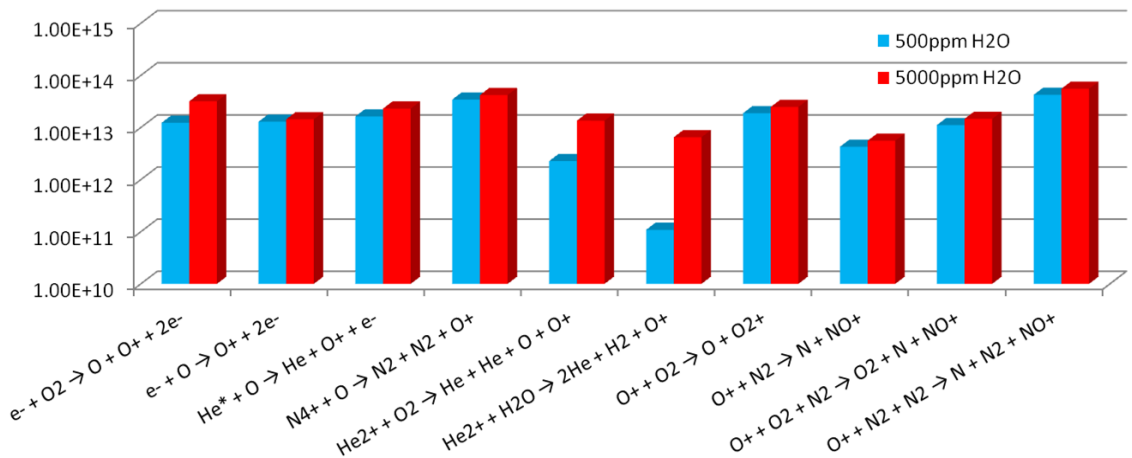
Na Slikama 92-96. prikazan je uticaj vodene pare na apsolutne prinose opisanih procesa.



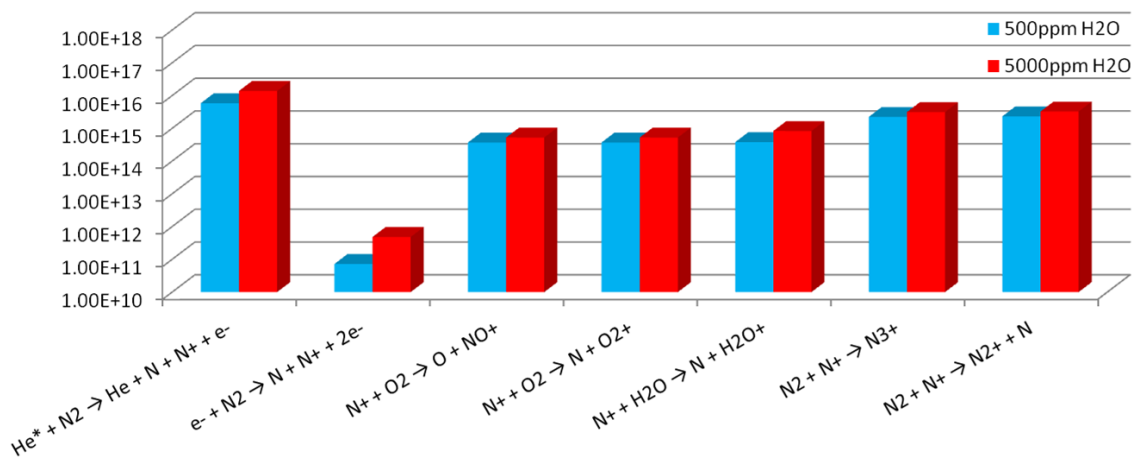
Slika 92. Prinosi proizvodnje i gašenja He* a) i He+ b) za 500ppm i 5000ppm H₂O.



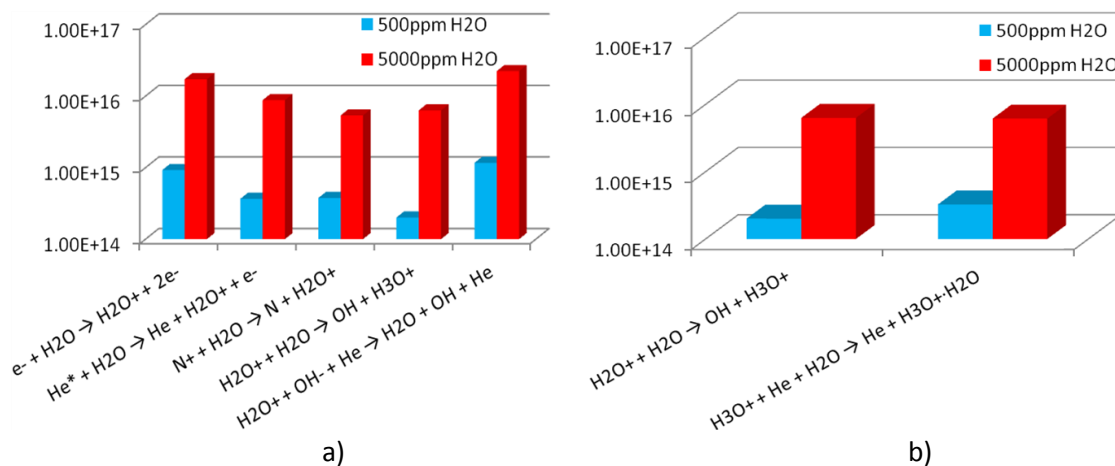
Slika 93. Prinosi proizvodnje i gašenja N₂⁺ a) i O₂⁺ b) za 500ppm i 5000ppm H₂O.



Slika 94. Prinosi proizvodnje i gašenja O⁺ za 500ppm i 5000ppm H₂O.



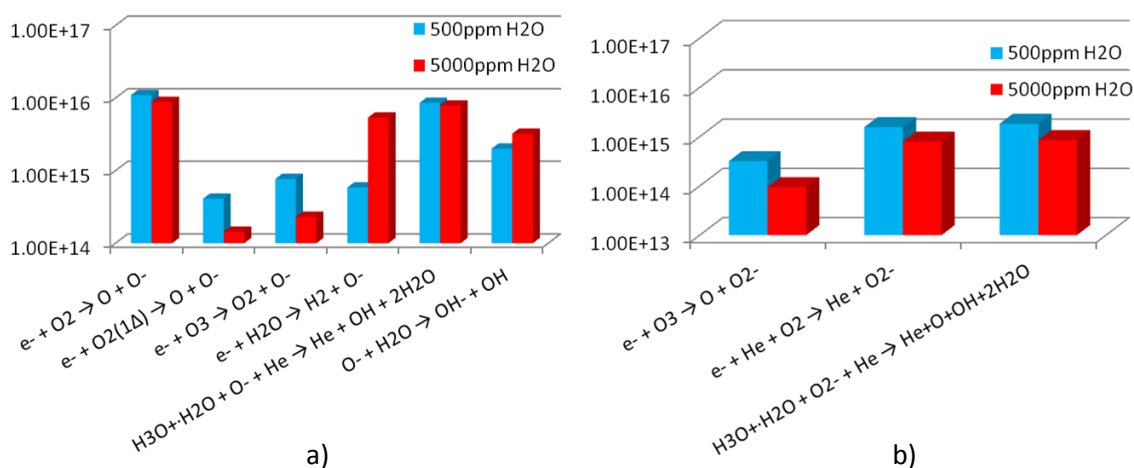
Slika 95. Prinosi proizvodnje i gašenja N^+ za 500ppm i 5000ppm H_2O .



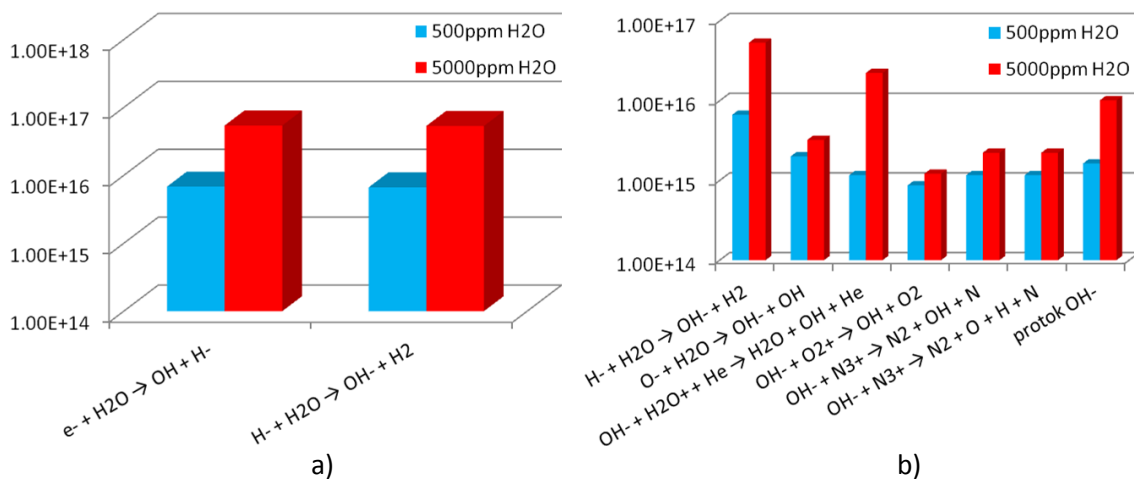
Slika 96. Prinosi proizvodnje i gašenja H_2O^+ a) i H_3O^+ b) za 500ppm i 5000ppm H_2O .

9.10 Proizvodnja i gašenje negativnih jona

Glavni procesi proizvodnje i gašenja jona O^- , O_2^- , H^- i OH^- za 1% vazduha i 7600ppm H_2O nakon 5ms su prikazani šematski na Slici 82, dok Slike 97a-b) i 98a-b) prikazuju promene u apsolutnim prinosima ovih procesa pri povećanju udela vodene pare u smeši sa 500ppm na 5000ppm.



Slika 97. Prinosi proizvodnje i gašenja O^- a) i O_2^- b) za 500ppm i 5000ppm H_2O .



Slika 98. Prinosi proizvodnje i gašenja H^- a) i OH^- b) za 500ppm i 5000ppm H_2O .

Za veće udele H_2O disocijativni zahvat $H_2O + e^- \rightarrow H_2 + O^-$ u proizvodnji jona O^- ima uporediv prinos kao disocijativni zahvat kod O_2 (Slika 97a). Glavni kanal proizvodnje jona O_2^- je tročestični zahvat uz atom He kao treće telo, međutim njegov

prinos opada sa povećanjem koncentracije vodene pare zbog niže koncentracije elektrona (Slika 97b). Glavni kanal gašenja oba jona je rekombinacija sa hidratom $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O}$ na čiju koncentraciju bitno utiče vodena para, dok na ukupni prinos rekombinacije utiče i promena u koncentraciji jona O^- i O_2^- .

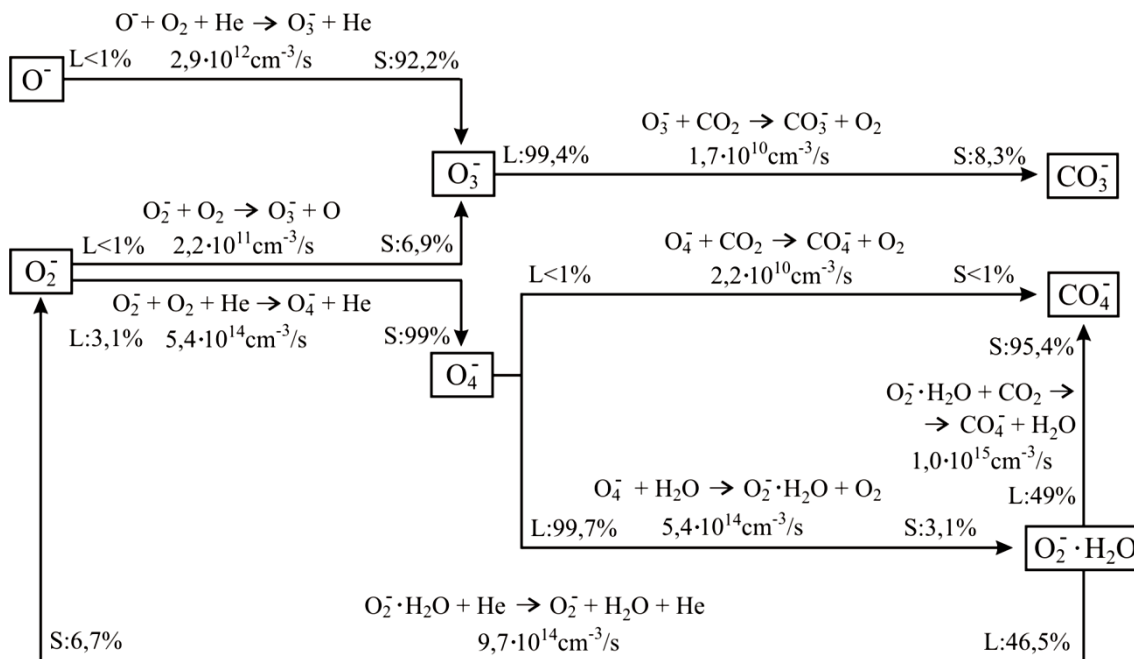
Proizvodnja jona H^- u disocijativnom zahvatu $\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}^-$ se za sve udele H_2O efikasno uravnotežava gašenjem kroz glavni proces proizvodnje jona OH^- $\text{H}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{OH}^-$, pri čemu prinosi oba procesa rastu sa koncentracijom vodene pare. Za 5000ppm H_2O u gašenju jona OH^- dolazi do izražaja proces rekombinacije koji značajno utiče i na gašenje jona H_2O^+ (Slika 98b i 96a).

Na Slikama 99-104. šematski su prikazani glavni procesi proizvodnje i gašenja preostalih negativnih jona u modelu, O_3^- , O_4^- , NO^- , NO_2^- , NO_3^- , CO_3^- , CO_4^- i njihovih hidrata za 1% vazduha, 7600ppm H_2O i vremenske intervale $1\mu\text{s}$ i 5ms , po analogiji sa šemama za pozitivne jone (Slike 73-80). U analizi ovih procesa treba imati u vidu vrednosti koncentracije i temperature elektrona nakon $1\mu\text{s}$ i 5ms (Slika 72a-b)

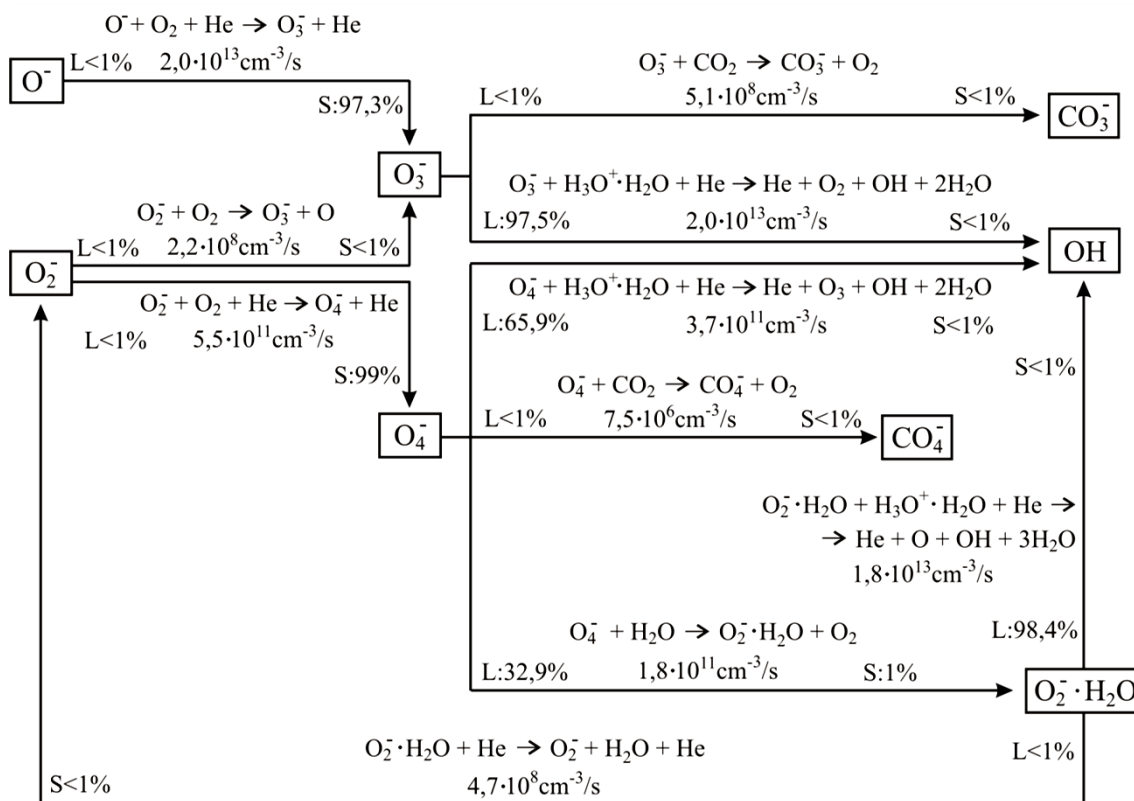
Joni O_3^- i O_4^- nastaju u tročestičnim procesima jonske konverzije jona O^- i O_2^- sa molekulima O_2 uz atom helijuma kao treće telo, pri čemu je inicijalno gašenje određeno procesima u kojima nastaju joni CO_3^- i $\text{O}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O}$. Nakon 5ms glavnu ulogu gašenja preuzima rekombinacija sa hidratom $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O}$ (Slika 99 i 100). Takođe, prinos u proizvodnji O_4^- opada zbog veće temperature elektrona na kojoj dominiraju disocijativni zahvati.

Na inicijalnu proizvodnju jona NO_2^- i NO_3^- značajno utiče hidrat $\text{O}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O}$ kroz reakcije sa NO i NO_2 , zbog izraženog tročestičnog zahvata elektrona tokom $1\mu\text{s}$, dok joni NO^- nastaju transferom naelektrisanja od jona NO_2^- (Slika 101). Nakon 5ms na proizvodnju jona NO_2^- i NO_3^- utiču joni O^- i O_2^- , kao i H^- u reakcijama sa NO_2 i NO_3 (Slika 102). Izvesne izmene u kinetici ovih jona bi mogli uneti procesi zahvata na elektronegativnim vrstama NO , NO_2 i NO_3 , koji nisu uključeni u globalni model zbog nedostataka odgovarajućih preseka u literaturi. Joni NO^- se efikasno gase sa molekulima O_2 dajući jedinjenje NO dok se joni NO_2^- i NO_3^- efikasno gase dajući hidrate.

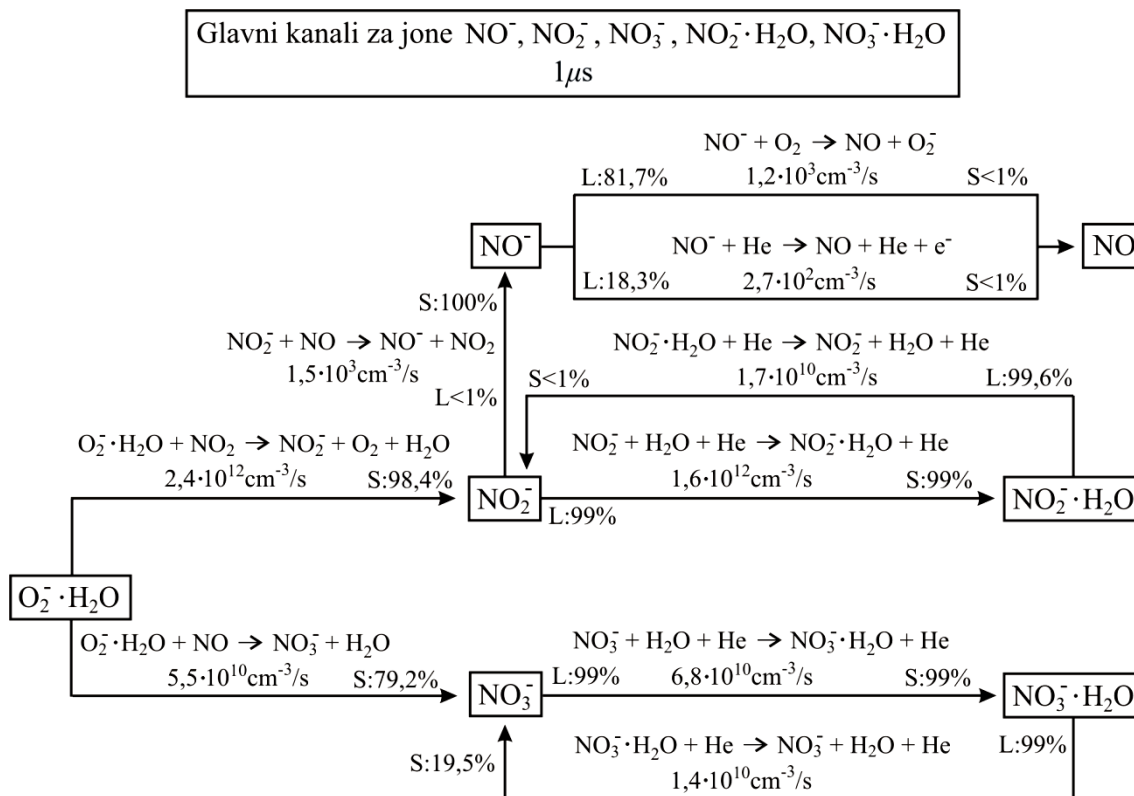
Joni CO_3^- nastaju transferom naelektrisanja od O^- uz atom helijuma kao treće telo. Analogni proces sa O_2^- u inicijalnoj proizvodnji jona CO_4^- ima manji značaj zbog izraženog procesa sa hidratom $\text{O}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O}$ (Slika 103). Nakon 5ms (Slika 104) dolaze do izražaja transfer naelektrisanja sa O_2^- i rekombinacija sa hidratom $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O}$.



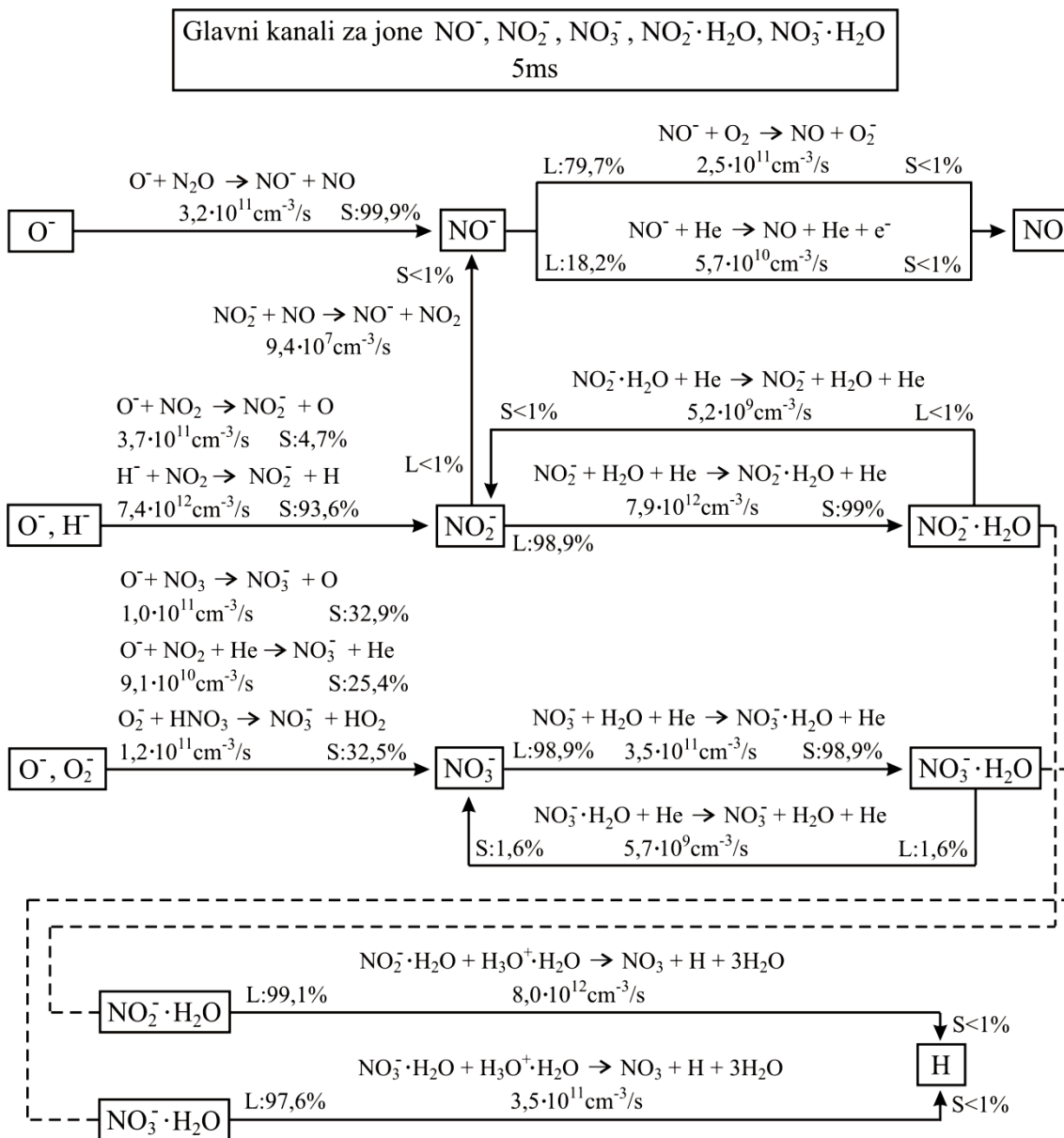
Slika 99. Glavni kanali za jone O_3^- i O_4^- tokom prve mikrosekunde.



Slika 100. Glavni kanali za jone O_3^- i O_4^- nakon 5ms.

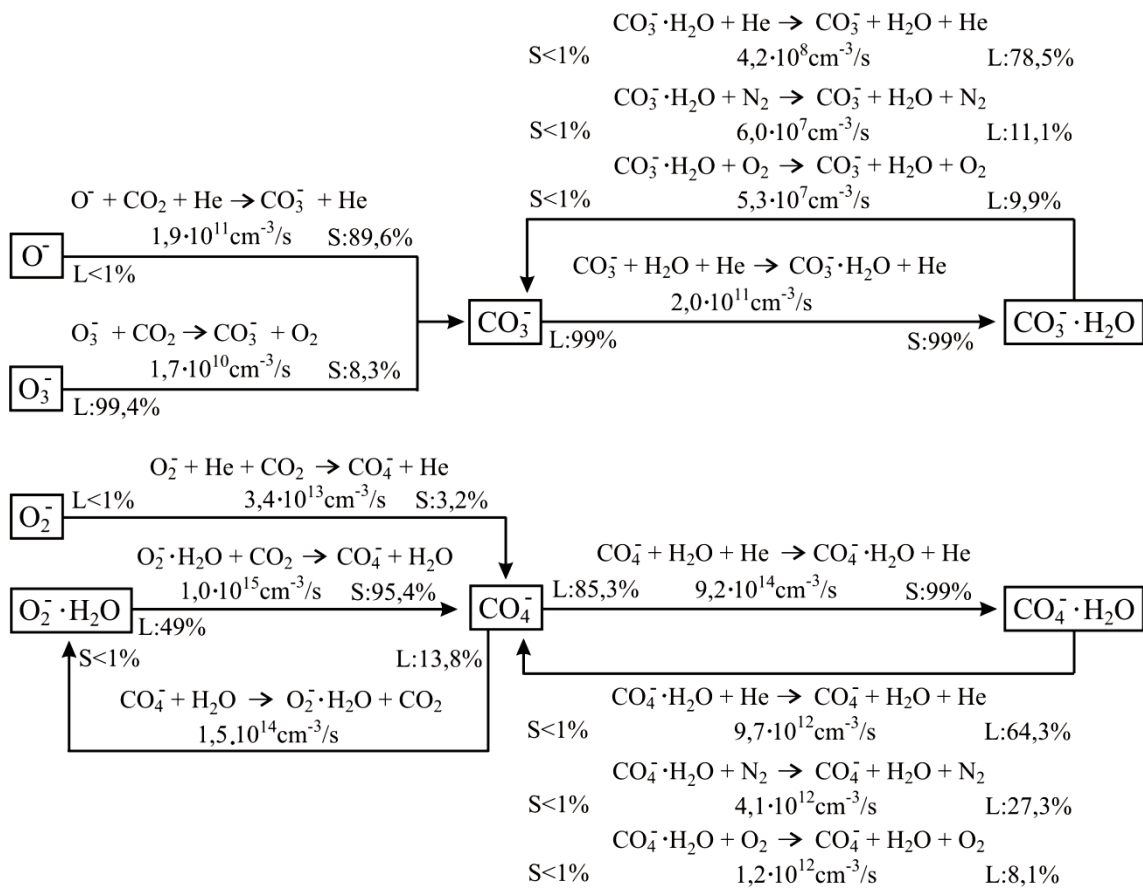


Slika 101. Glavni kanali za jone NO^- , NO_2^- , NO_3^- i njihove hidrate tokom prve mikrosekunde.



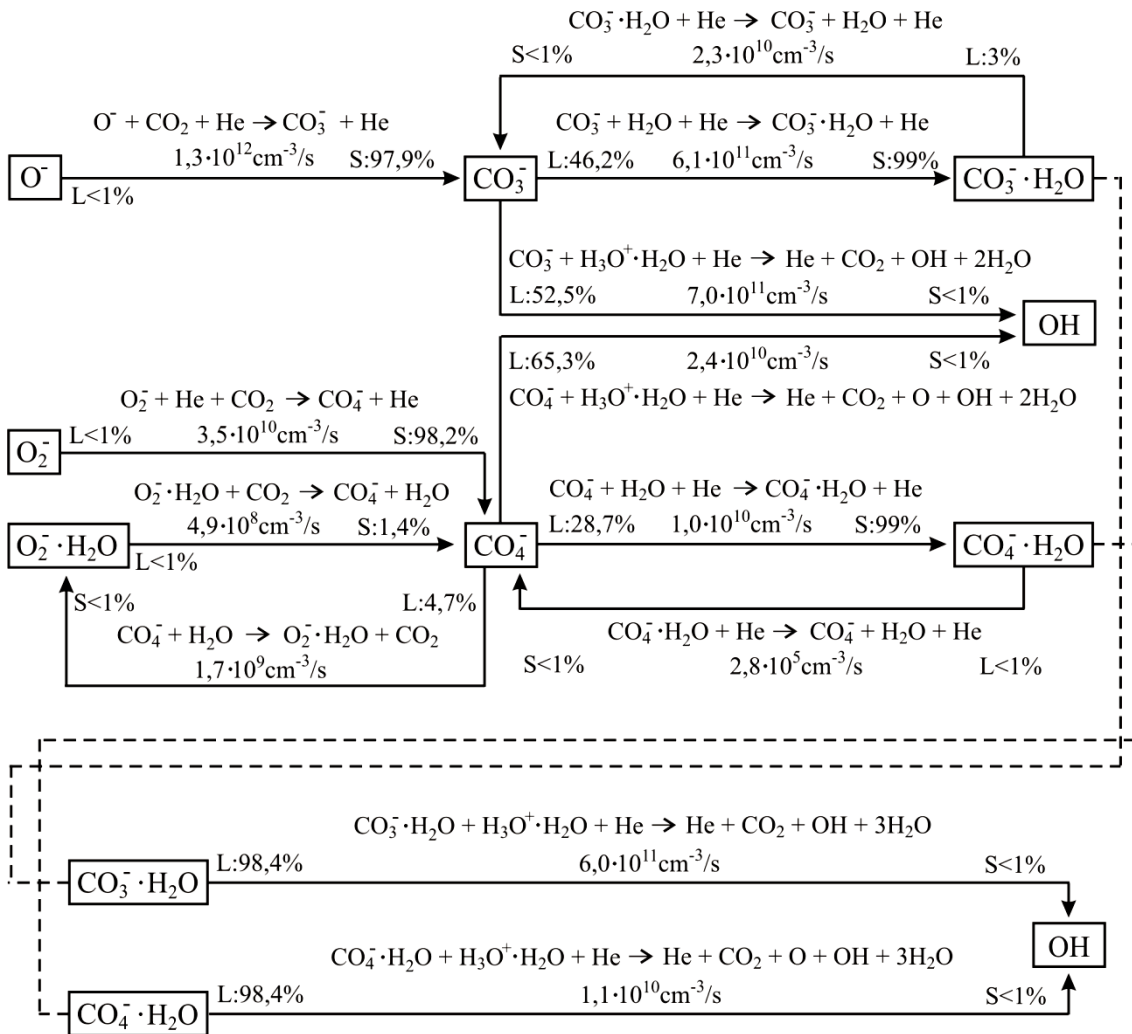
Slika 102. Glavni kanali za jone NO^- , NO_2^- , NO_3^- i njihove hidrate nakon 5ms.

Glavni kanali za jone CO_3^- , CO_4^- , $\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O}$
 $1\mu\text{s}$



Slika 103. Glavni kanali za jone CO_3^- , CO_4^- i njihove hidrate tokom prve mikrosekunde.

Glavni kanali za jone CO_3^- , CO_4^- , $\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O}$
5ms



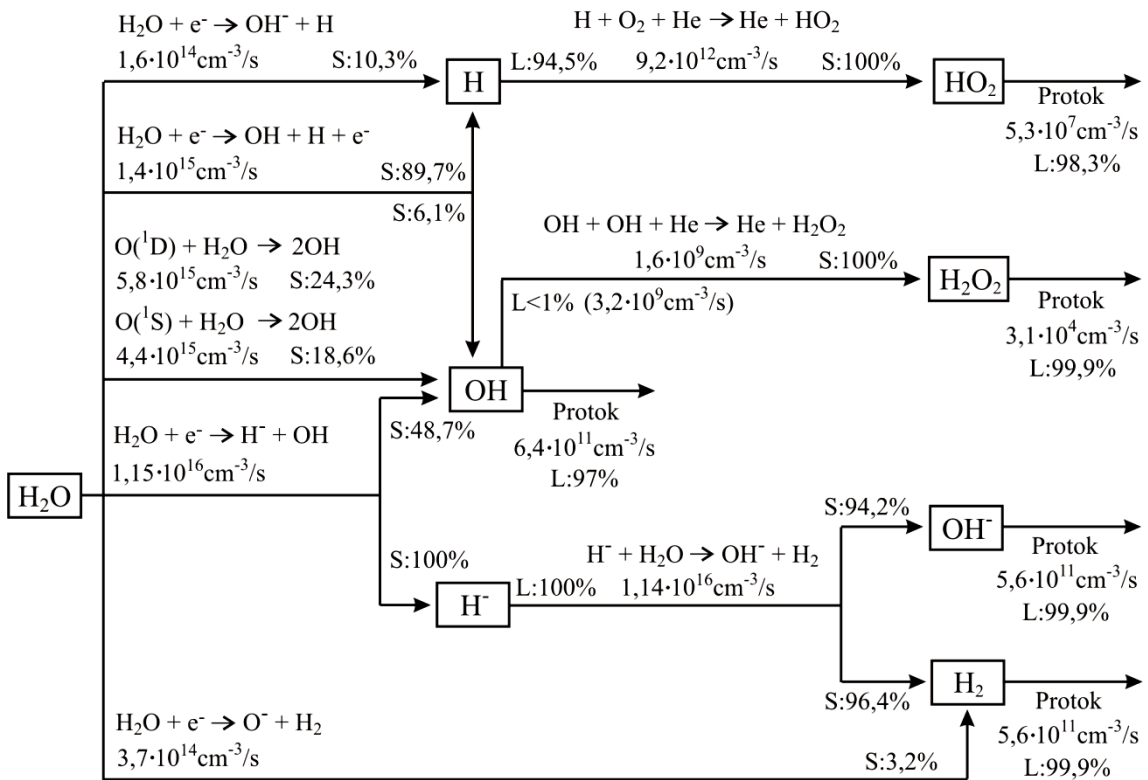
Slika 104. Glavni kanali za jone CO_3^- , CO_4^- i njihove hidrate nakon 5ms.

9.11 Proizvodnja i gašenje reaktivnih kiseoničnih i azotnih jedinjenja

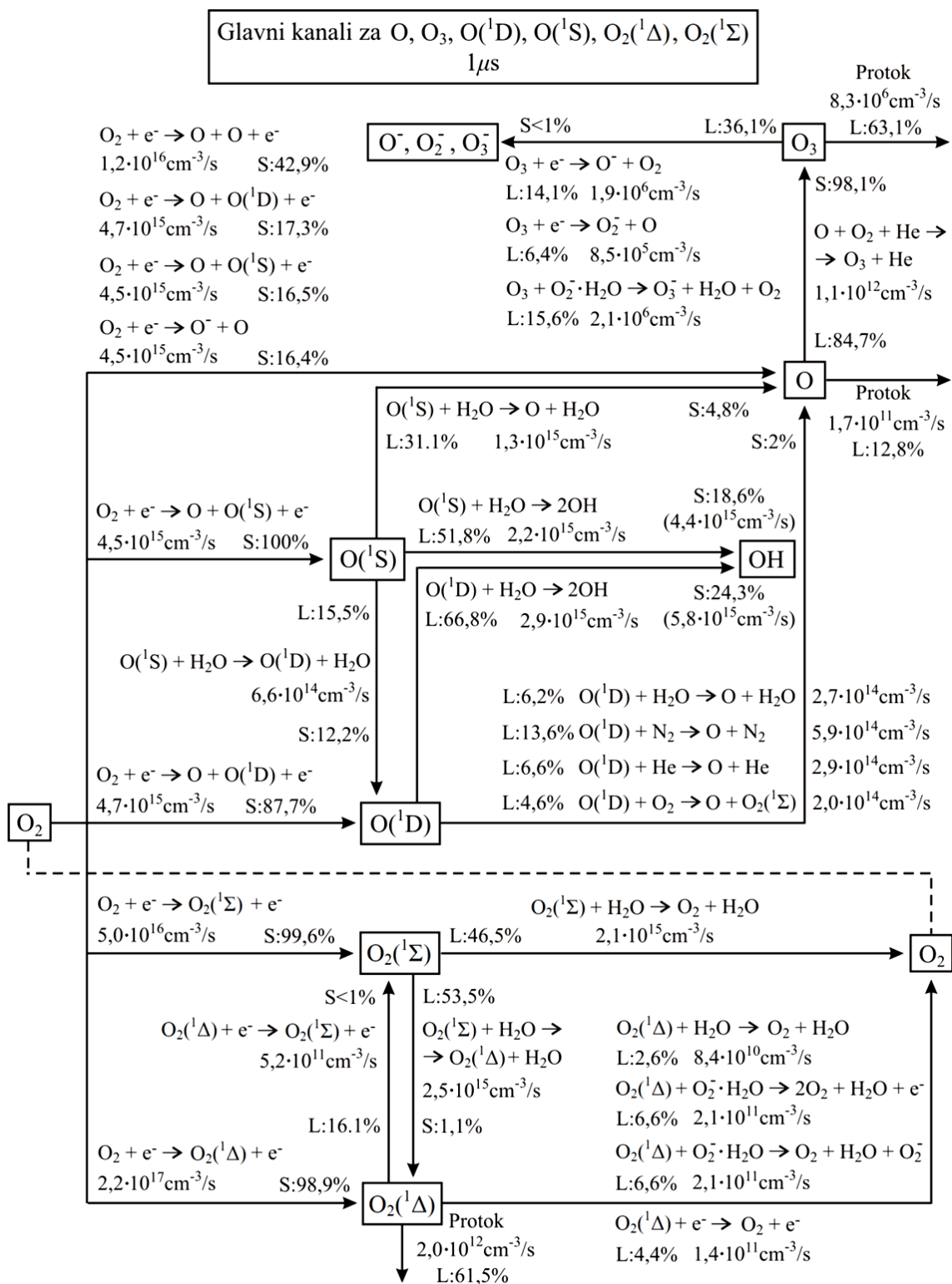
U ovom Odeljku je prikazana analiza hemijske kinetike reaktivnih kiseoničnih i azotnih jedinjenja, bitnih za primene LTP na atmosferskom pritisku, uključenih u globalni model. Rezultati su prikazani na Slikama 105-111, za 1% vazduha, 7600ppm H₂O i vremenske intervale 1μs i 5ms.

U toku prve mikrosekunde (Slike 105-107) atomi H, O, O(¹S), O(¹D), N, N(²D) i N(²P) nastaju u procesima disocijacije molekula H₂O, O₂ i N₂ elektronskim udarom. Upoređivanjem prinosa može se zaključiti da se inicijalno najbrže formiraju atomi kiseonika ($2,57 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$, Slika 106) zatim vodonika ($1,4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$, Slika 105) i azota ($1,0 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}/\text{s}$, Slika 107), što je u skladu sa odnosom koeficijenata brzine za disocijaciju prikazanih na Slici 84d). U reakcijama navedenih atoma sa O₂ i H₂O inicijalno nastaju važna reaktivna jedinjenja u plazmi. Glavni proces gašenja atoma kiseonika jeste asocijacija sa molekulima O₂ uz učešće atoma helijuma, u kojoj nastaju molekuli ozona O₃ (Slika 106), dok u analognom procesu atomi vodonika proizvode jedinjenje HO₂ (Slika 105). Atomi O(¹S) i O(¹D) značajno doprinose proizvodnji OH radikala u reakcijama sa molekulima H₂O. Najizraženiji proces inicijalne proizvodnje OH radikala je disocijativni zahvat elektrona, koji ima za red veličine veći prinos u odnosu na disocijaciju molekula H₂O elektronskim udarom, zbog niže vrednosti temperature elektrona 1eV nakon 1μs (Slika 105 i 72a). Tročestičnom asocijacijom OH radikali efikasno proizvode vodonik peroksid H₂O₂. Atomi azota N, N(²D) i N(²P) u reakcijama sa kiseonikom inicijalno proizvode NO kao jedno od najvažnijih jedinjenja za primenu LTP u bimediciini (Slika 107), pri čemu treba naglasiti da je NO sastojak osnovnog gasa u modelu kao i NO₂ (Tabela 12), tako da na njihovu inicijalnu proizvodnju značajno utiče dotok. Dotok koji opisuje proizvodnju gasa na početku simulacije i protok koji opisuje potrošnju imaju približno iste apsolutne prinose. Apsolutni prinos procesa potrošnje NO u kojem nastaju joni NO₃⁻ jednak je ukupnom prinosu hemijskih reakcija između atoma N, N(²D), N(²P) i molekula O₂. Analogni proces potrošnje NO₂ uravnotežava se hemijskim reakcijama u sprezi sa NO i NO₃ koje dolaze do izražaja u formiranoj plazmi nakon 5ms. Konačno, kiseline HNO, HNO₂ i HNO₃ koje takođe spadaju u značajna jedinjenja za primenu, inicijalno nastaju u reakcijama oksida NO i NO₂ sa atomima H i OH radikalima.

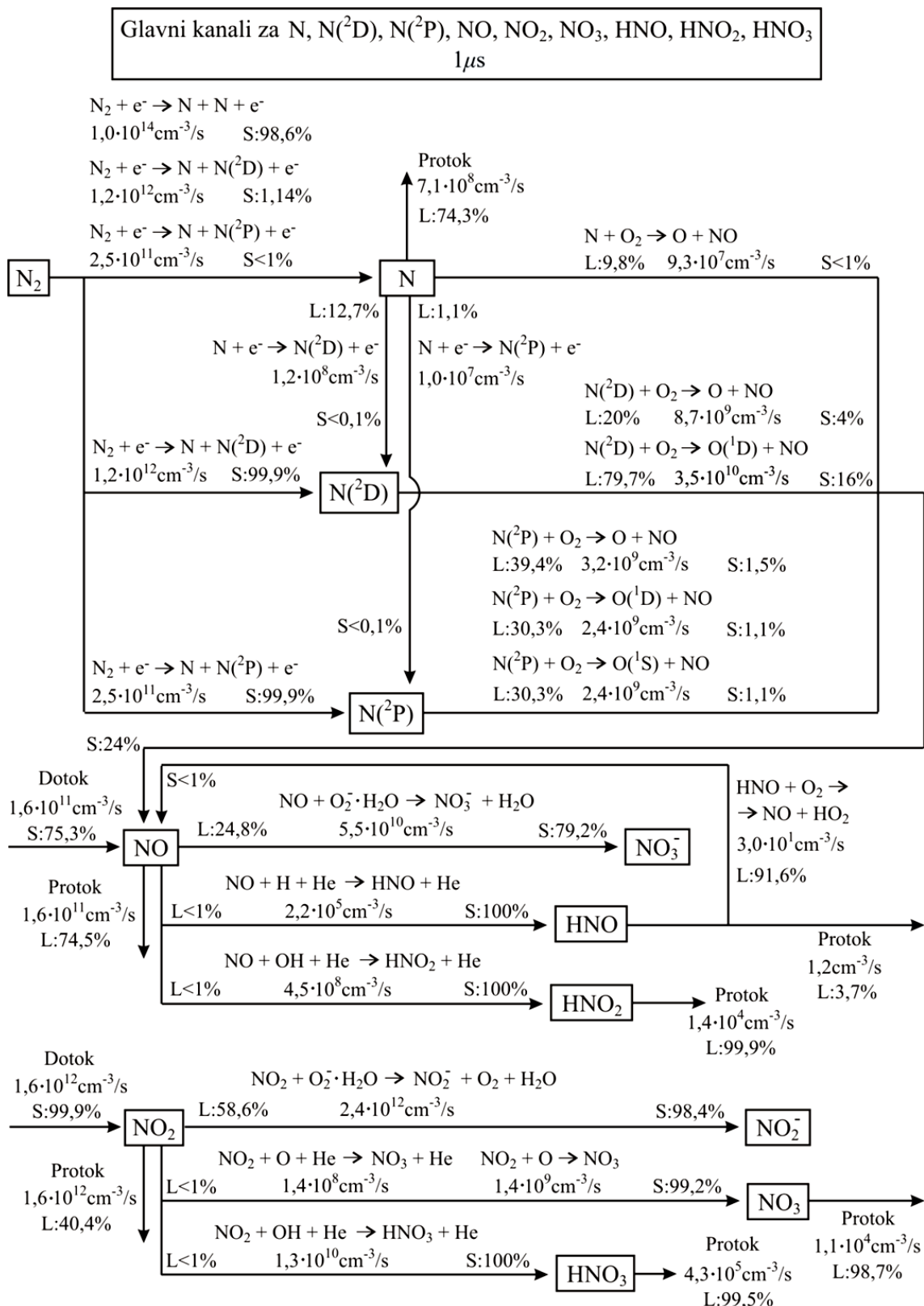
Glavni kanali za H, H₂, OH, HO₂, H₂O₂
1μs



Slika 105. Glavni kanali za H, OH, H₂, HO₂ i H₂O₂ tokom prve mikrosekunde.



Slika 106. Glavni kanali za O, O₃, O(¹D), O(¹S), O₂(¹Δ), O₂(¹Σ) tokom prve mikrosekunde.



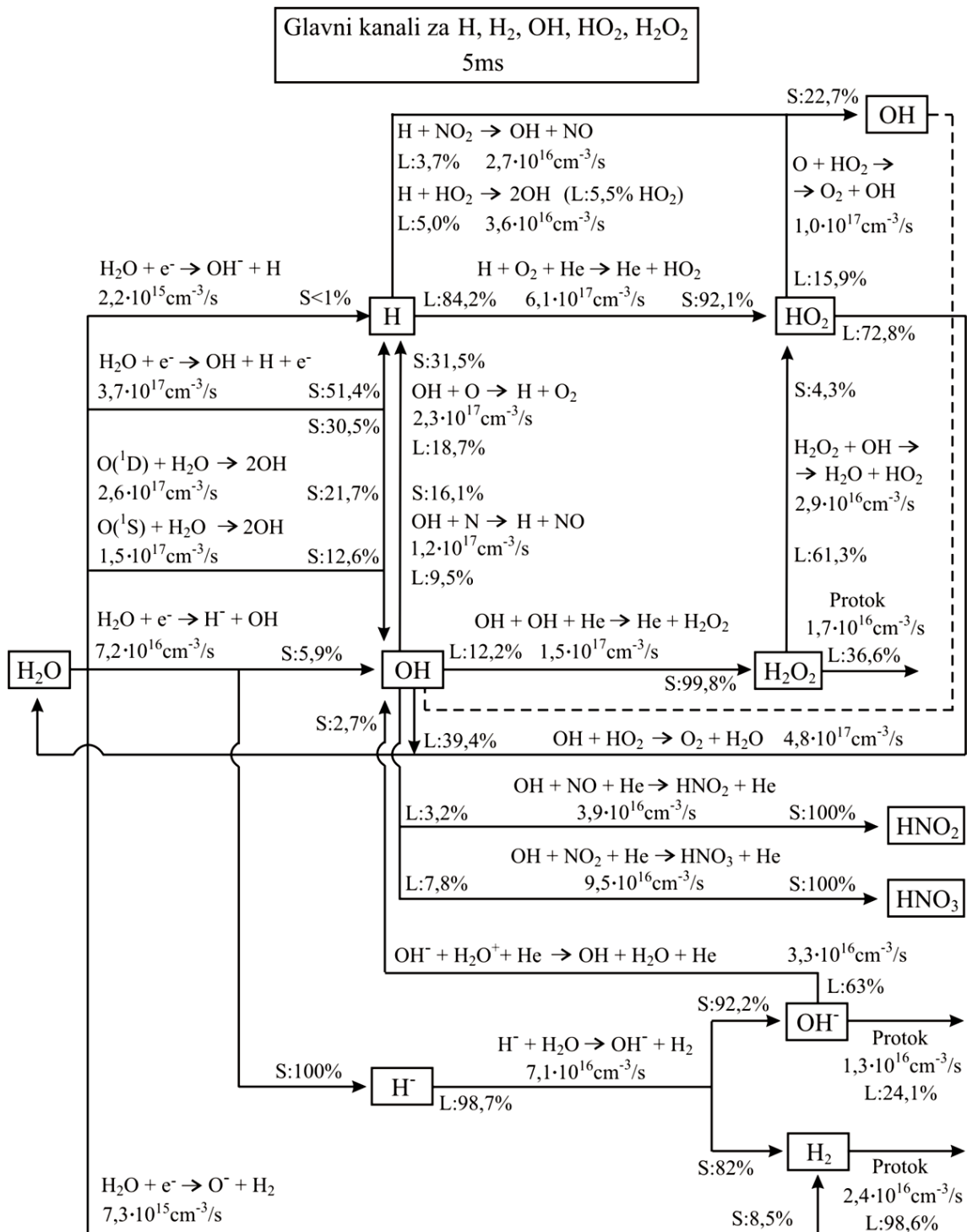
Slika 107. Glavni kanali za N, N(²D), N(²P), NO_x i HNO_x tokom prve mikrosekunde.

Na Slikama 108-111. šematski su prikazani hemijski procesi između kiseoničnih i azotnih vrsta koji dolaze do izražaja u plazmi nakon 5ms.

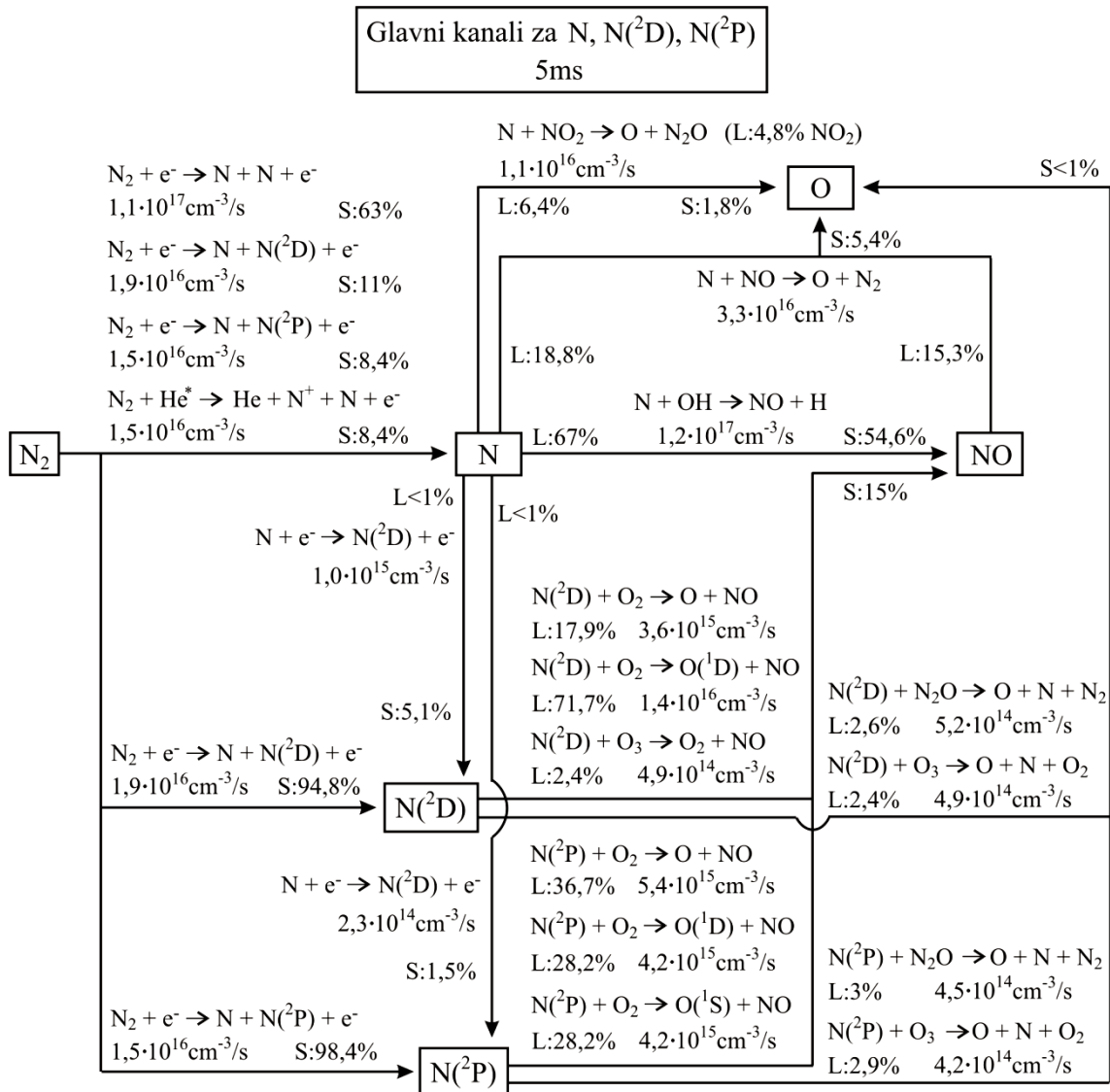
Obzirom da u dužim vremenskim intervalima temperatura elektrona dostiže vrednosti iznad 4eV zbog izraženog zahvata elektrona na molekulima H₂O (Slika 72a,b), prinos disocijacije molekula H₂O elektronskim udarom se povećava za dva reda veličine i ona postaje najznačajniji proces proizvodnje OH radikala (Slika 108), za razliku od disocijativnog zahvata elektrona koji dominira tokom prve mikrosekunde. Takođe, disocijacija H₂O predstavlja najvažniji proces proizvodnje atoma vodonika. Reakcije pobuđenih atoma O(¹S) i O(¹D) sa molekulima H₂O i dalje značajno proizvode OH radikal zbog pojačane disocijacije molekula O₂ (Slika 109). Gašenje OH radikala sa atomima O i N značajno proizvodi atome vodonika, koji se efikasno prevode u molekule HO₂ tročestičnom asocijacijom sa molekulima O₂. Analogni proces asocijacije OH radikala efikasno proizvodi jedinjenje H₂O₂. Pored opisanih procesa, u dužim vremenskim intervalima dolazi do izražaja hemijska reakcija između OH i HO₂ (Slika 108), sa značajnim doprinosom u gašenju obe vrste.

Dominantan proces proizvodnje ozona O₃ je tročestična asocijacija atoma i molekula kiseonika (Slike 109). Takođe, može se zaključiti da se u formiranoj plazmi javljaju hemijske reakcije gašenja atoma O, koje sprežu kinetiku ove vrste sa kinetikom drugih važnih jedinjenja H, OH, NO, NO₂, NO₃. Pobuđena stanja O(¹S), O(¹D), i O₂(¹Σ) se efikasno gase u reakcijama sa molekulima H₂O, dok na gašenje pobuđenog stanja O₂(¹Δ) najizraženiji uticaj ima reakcija sa molekulima NO.

Po analogiji sa O₂ i H₂O, prinos disocijacija molekula N₂ se povećava za dva reda veličine sa temperaturom elektrona tokom 5ms (Slika 110). Pobuđeni atomi azota se efikasno prevode u molekule NO reakcijama sa molekulima O₂. Za razliku od inicijalne kinetike (Slika 107) dolazi do izražaja reakcija između atoma N i OH radikala, koja preuzima važnu ulogu u proizvodnji molekula NO, kao i reakcija između N i NO značajna za gašenje obe vrste. Ukupnom prinosu svih procesa između N, N(²D), N(²P) i OH, O₂ odgovara čak 70% proizvodnje jedinjenja NO (Slika 111). Molekuli NO reakcijom sa atomima kiseonika proizvode molekule NO₂, koji u analognim procesima proizvode NO₃. Takođe, dolaze do izražaja i procesi sa H, OH i HO₂ koji sprežu kinetiku oksida azota. Azotne kiseline se efikasno proizvode asocijacijom oksida NO i NO₂ sa atomima H i OH radikalima.

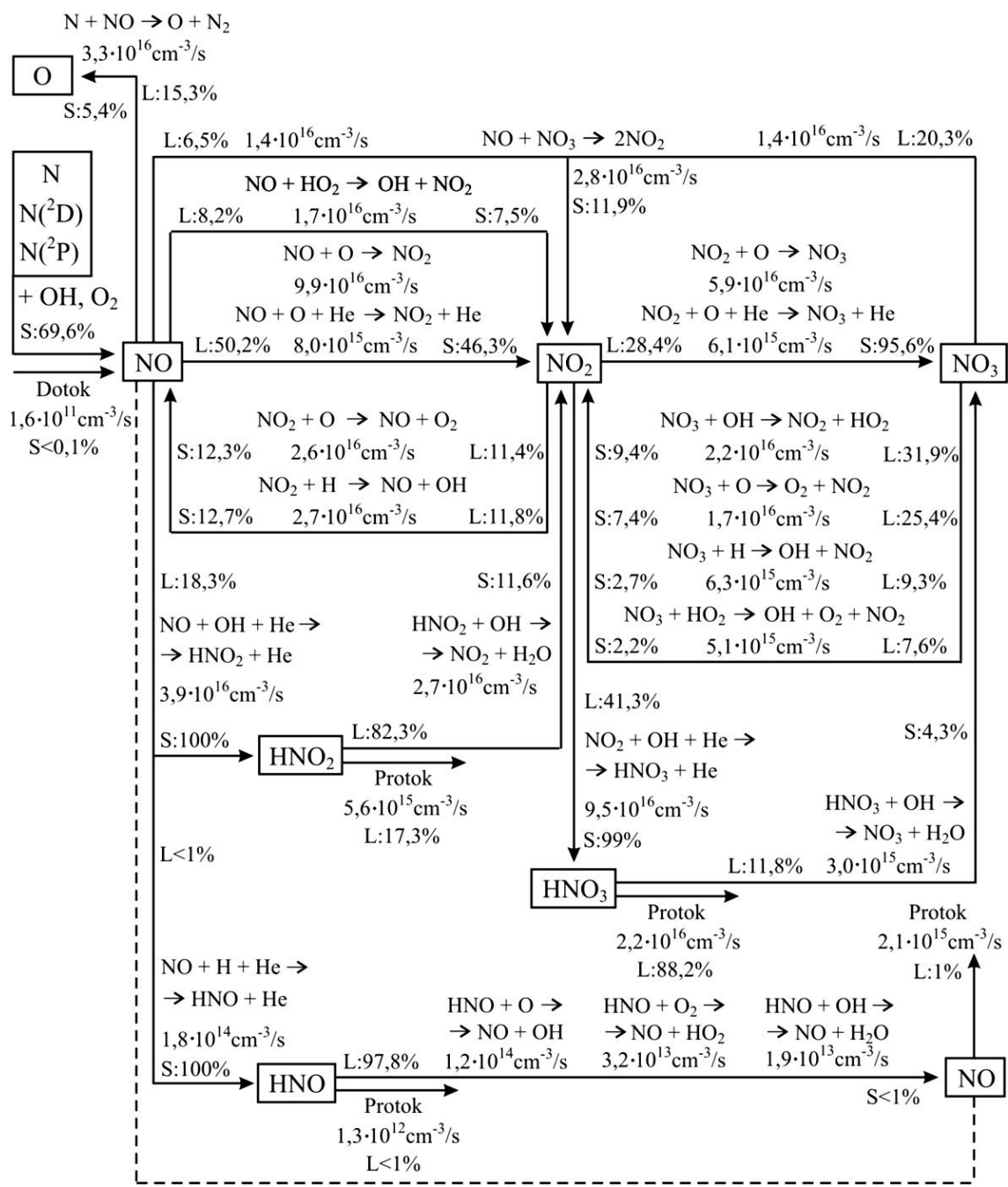


Slika 108. Glavni kanali za H, OH, H₂, HO₂ i H₂O₂ nakon 5ms.



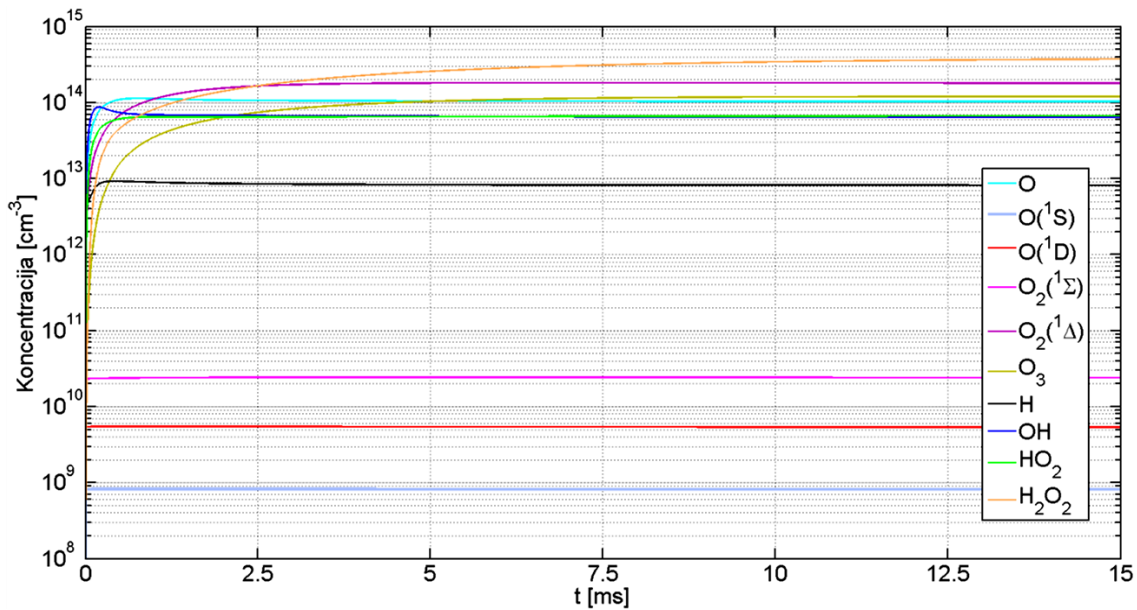
Slika 110. Glavni kanali za N, N(²D) i N(²P) nakon 5ms.

Glavni kanali za NO, NO₂, NO₃, HNO, HNO₂, HNO₃
5ms

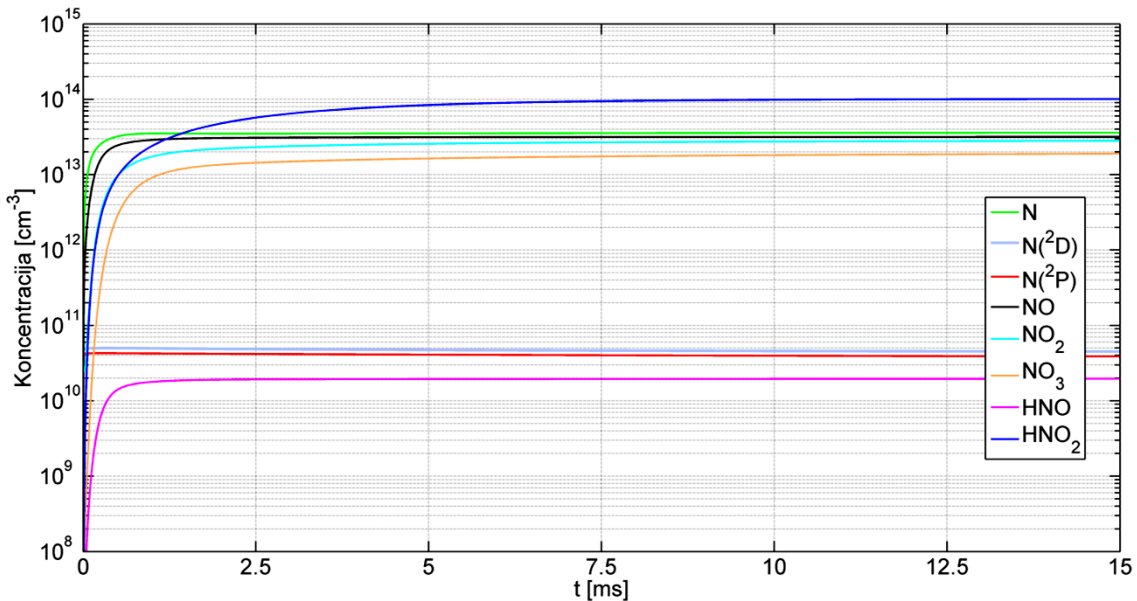


Slika 111. Glavni kanali za NO_x i HNO_x nakon 5ms.

Na Slikama 112-113. prikazane su koncentracije nekih važnijih RONS u toku 15ms, izračunate na osnovu globalnog modela za 1% vazduha i 7600ppm H₂O. Može se zaključiti da koncentracije mnogih vrsta dostižu stacionarne vrednosti u intervalu 10¹³-10¹⁴ cm⁻³ nakon 2ms. Pobuđena stanja O(¹D), O(¹S), O₂(¹Σ), N(²D) i N(²P) imaju niže koncentracije zbog gašenja sa H₂O odnosno O₂ u kojima nastaju jedinjenja OH i NO (Slika 109 i 110). Izuzetak je stanje O₂(¹Δ) na čije gašenje ne utiče vodena para (koeficijent brzine je reda 10⁻¹⁷ cm³/s, videti listu procesa u Dodatku 1).



Slika 112. Koncentracije kiseoničnih vrsta za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare.



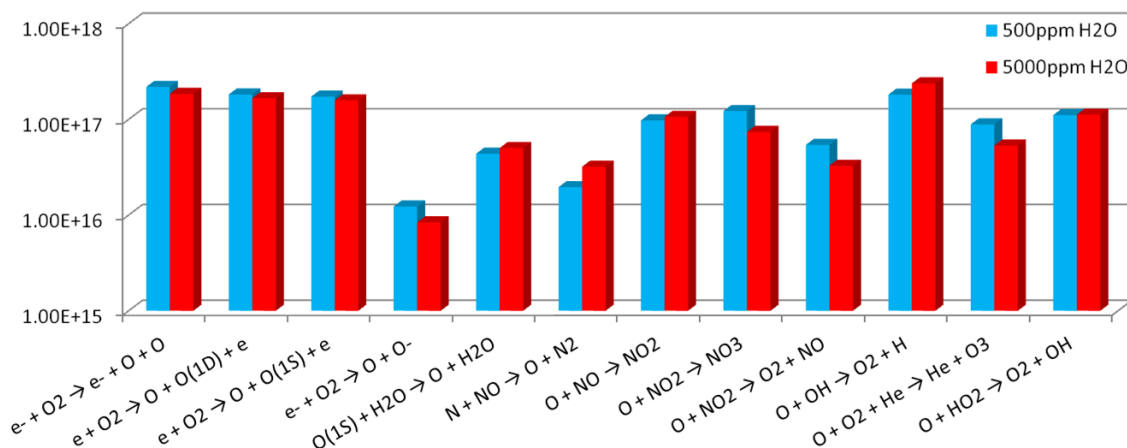
Slika 113. Koncentracije azotnih vrsta za 1% vazduha i 7600ppm vodene pare.

Procesi na šemama 108-111. igraju najbitniju ulogu u hemijskoj kinetici prikazanih vrsta od svih procesa uključenih u globalni model, međutim njihovi prinosi variraju u zavisnosti od koncentracije i temperature elektrona, kao i udela vodene pare od 20ppm do 10000ppm. Na Slikama 114-120. prikazani su apsolutni prinosi proizvodnje i gašenja najvažnijih reaktivnih kiseoničnih i azotnih vrsta za 500ppm i 5000ppm vodene pare.

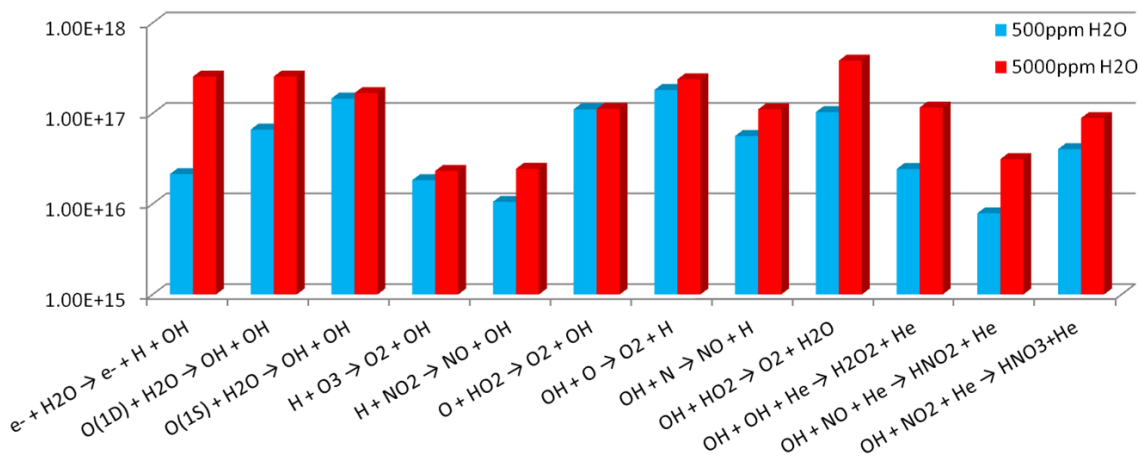
Povećanje udela H₂O u smeši indirektno dovodi do blagog smanjenja prinosa disocijacije O₂ zbog manje koncentracije elektrona (Slika 114). U slučaju disocijacije H₂O situacija je obrnuta, što utiče na pojačanu proizvodnju H i OH, ali i na gašenje atoma O (Slika 115, 116b i 114). Niža koncentracija atoma kiseonika snižava prinos proizvodnje ozona (Slika 116a). Veća koncentracija H i OH dovodi do pojačane proizvodnje H₂O₂ i HO₂ (Slika 117a,b).

Za razliku od disocijacije O₂, pri povećanju udela vodene pare prinosi disocijacije molekula N₂ imaju veće vrednosti (Slika 118). Koeficijenti brzine ovih procesa se značajnije menjaju sa porastom temperature elektrona u odnosu na koeficijente za disocijaciju molekula O₂, zbog većeg praga. Pojačana proizvodnja atoma N, N(²D) i N(²P) povećava prinose procesa proizvodnje NO (Slika 119) a time i azotnih kiselina (Slika 120a,b).

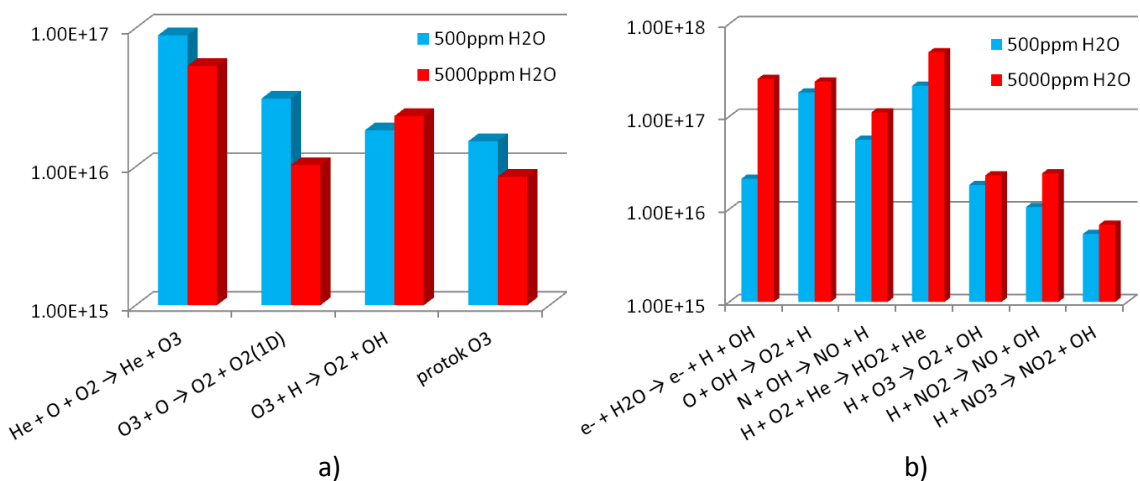
Treba imati u vidu da promena prinosa u proizvodnji neke vrste takođe izaziva promenu u prinosima gašenja preko koncentracije na kojoj nastupa dinamička ravnoteža.



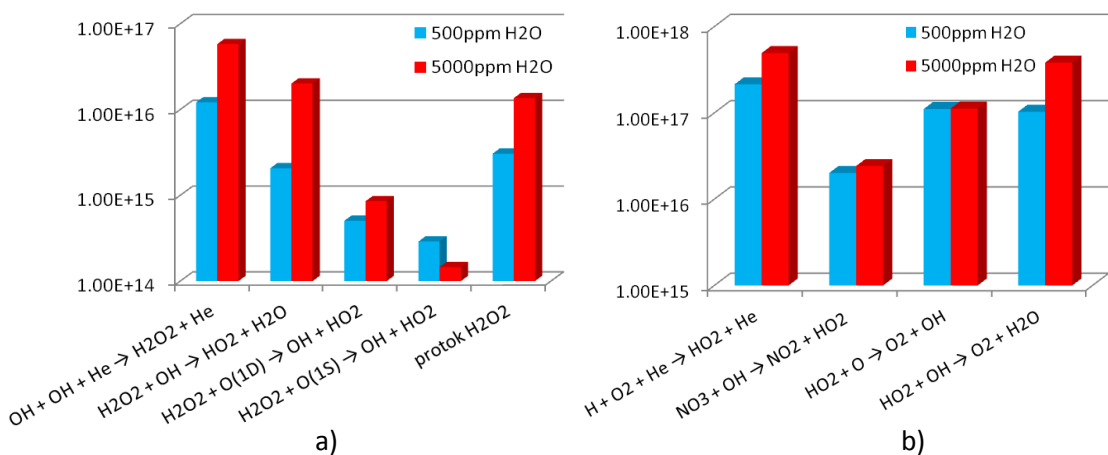
Slika 114. Prinosi proizvodnje i gašenja atoma O za 500ppm i 5000ppm H₂O.



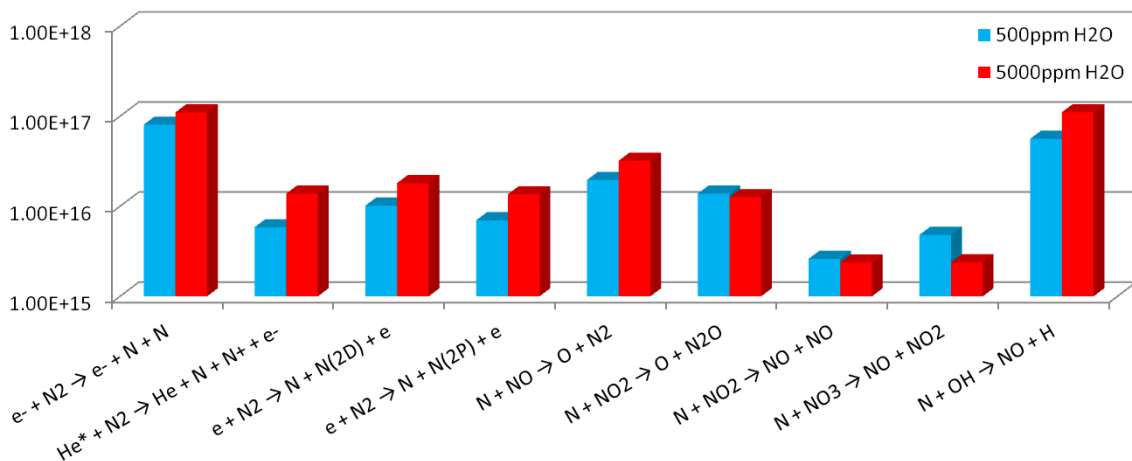
Slika 115. Prinosi proizvodnje i gašenja OH radikala za 500ppm i 5000ppm H₂O.



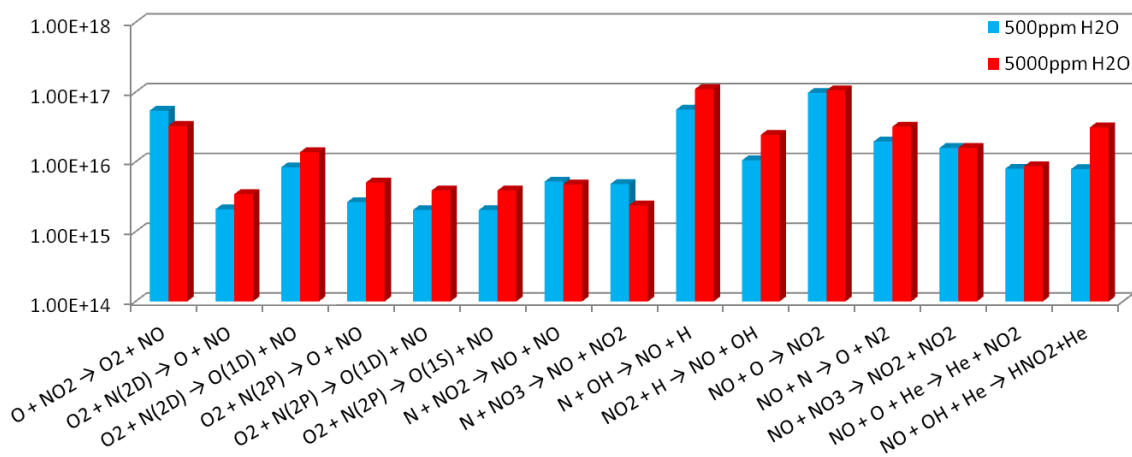
Slika 116. Prinosi proizvodnje i gašenja molekula O₃ a) i atoma H b) za 500ppm i 5000ppm H₂O.



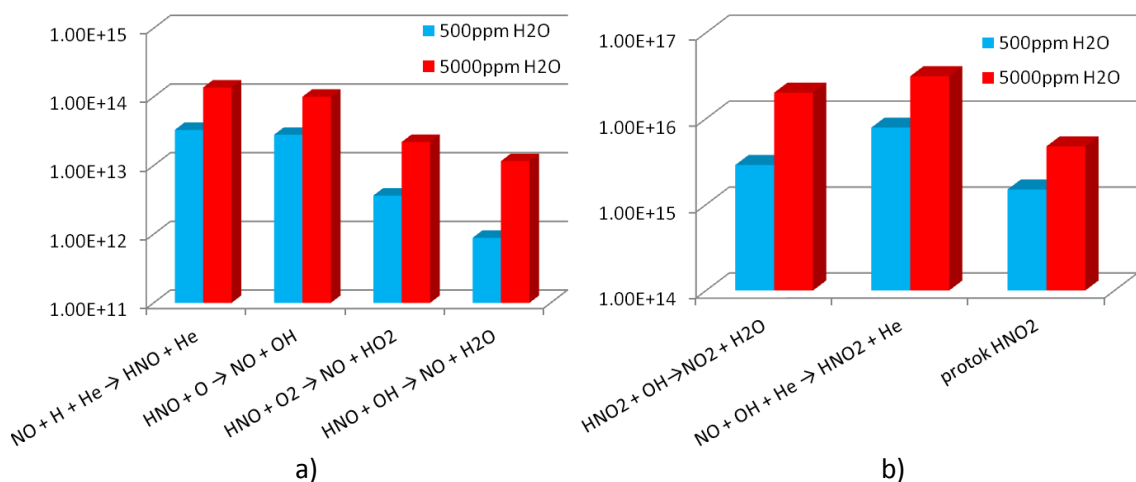
Slika 117. Prinosi proizvodnje i gašenja molekula H₂O₂ a) i HO₂ b) za 500ppm i 5000ppm H₂O.



Slika 118. Prinosi proizvodnje i gašenja atoma N za 500ppm i 5000ppm H₂O.



Slika 119. Prinosi proizvodnje i gašenja molekula NO za 500ppm i 5000ppm H₂O.



Slika 120. Prinosi proizvodnje i gašenja molekula HNO a) i HNO₂ b) za 500ppm i 5000ppm H₂O.

10. ZAKLJUČAK

Glavni cilj istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji predstavlja proučavanje fizičkih i hemijskih procesa u niskotemperaturnim plazmama na atmosferskom pritisku, formiranim u helijumu ili smeši helijum/kiseonik, koje se nalaze u kontaktu sa vlažnim vazduhom, na osnovu 0D globalnih modela.

U Poglavlju 1 dat je pregled najvažnijih karakteristika niskotemperaturne plazme, sa akcentom na uzroke koji dovode do izraženog odstupanja od stanja lokalne termodinamičke ravnoteže. Poglavlje 2 daje osvrt na široko polje primena ovih tipova plazmi, od kojih se posebno izdvajaju niskotemperaturne plazme na atmosferskom pritisku sa važnom primenom u modifikaciji površina i novijom primenom u biomedicini, tretmanu ćelija i tkiva. Pored odstupanja od stanja lokalne termodinamičke ravnoteže, bitna osobenost ovih plazmi je što imaju veoma složen hemijski sastav i predstavljaju efikasan izvor reaktivnih jedinjenja.

U Poglavlju 3 je dat standardan teorijski opis transportnih i sudarnih procesa elektrona u slabojonizovanoj niskotemperaturnoj plazmi, baziran na kinetičkoj teoriji gasnih pražnjenja i modelu roja elektrona u hidrodinamičkom režimu. Detaljno je opisan metod za rešavanje Boltzmanove kinetičke jednačine za elektrone i proračun funkcije raspodele elektrona po energiji u aproksimaciji dva člana, sa osvrtom na proračun transportnih koeficijenata i koeficijenata brzine elektronskih sudarnih procesa pomoću programa BOLSIG+.

Poglavlje 4 sadrži pregled najvažnijih modela plazme, pri čemu je posebna pažnja posvećena modifikaciji hidrodinamičkih (fluidnih) jednačina uključivanjem nekonzervativnih sudarnih procesa i njihovog uticaja na koncentracije i srednje energije čestica u plazmi. Prostornim usrednjavanjem fluidnih jednačina koje uključuju nekonzervativne procese zasnovan je sistem balansnih jednačina 0D globalnog modela za analizu fizičkih i hemijskih procesa kao i za opis hemijske kinetike čestica u niskotemperaturnoj plazmi.

U Poglavlju 5 analiziran je uticaj odabrane baze preseka na funkciju raspodele elektrona po energiji i koeficijente brzine, neophodne za rešavanje sistema balansnih jednačina globalnog modela. Proračun je vršen pomoću programa BOLSIG+ u aproksimaciji dva člana, sa presecima za rasejanje elektrona na atomu helijuma i

molekulu H₂O iz baza LXCat i Quantemol-DB. U slučaju helijuma pokazano je da korišćenje preseka za elastično rasejanje kao preseka za elastični prenos impulsa dovodi do značajnih promena u funkciji raspodele elektrona, a time do promena u vrednostima brzine drifta i koeficijenata brzine za sve procese čiji su preseki uključeni u proračun. Pri tom, promene su izraženije kod procesa sa većim pragom zbog složene zavisnosti koeficijenta brzine od srednje energije elektrona. U slučaju vodene pare pokazano je da razlika u presecima za elastični prenos impulsa iz baza LXCat i Quantemol-DB dovodi do značajnih razlika u funkciji raspodele elektrona po energiji. Takođe, prikazan je uticaj preseka za disocijaciju molekula H₂O kao važnog procesa proizvodnje OH radikala na funkciju raspodele elektrona i koeficijente brzine.

U Poglavlju 6 prikazani su rezultati globalnog modela koji uključuje 59 vrsta čestica povezanih sa 1048 fizičkih i hemijskih procesa, za RF plazma mlaz u smeši He + 0,5% O₂, sa 250ppm vlažnog vazduha relativne vlažnosti 1%. Proračun koncentracija komponenata plazme tokom vremena vršen je sa konstantnom koncentracijom elektrona, dok je za promenu temperature elektrona tokom vremena korišćen analitički fit sa srednjom energijom 2,45eV i frekvencijom 12,5MHz. Funkcija raspodele elektrona po energiji je izračunata pomoću programa BOLSIG+ sa presecima za elektronske sudarne procese iz baze Morgan LXCat, i pokazano je da postoji značajna razlika između neravnotežne i ravnotežne Maksvel-Bolcmanove raspodele u oblastima energija koje odgovaraju pragovima neelastičnih procesa. Pokazano je da odabir neravnotežne funkcije raspodele elektrona po energiji, umesto Maksvel-Bolcmanove raspodele, prilikom proračuna koeficijenata brzine uvodi značajne razlike u rezultatima globalnog modela odnosno hemijskom sastavu plazme. Takođe, analiziran je uticaj neravnotežne funkcije raspodele na hemijsku kinetiku jona helijuma i kiseonika. Pokazano je da glavni kanal proizvodnje jona helijuma predstavlja jonizacija metastabila udarom elektrona, kao i da prinosi Peningove jonizacije u proizvodnji jona kiseonika opadaju za više od dva reda veličine. Pored toga, analiziran je uticaj koncentracije elektrona kao bitnog parametra plazme na funkciju raspodele elektrona po energiji, koeficijente brzine i rezultate globalnog modela odnosno hemijski sastav plazme. Pokazano je da ekstremno povećanje koncentracije elektrona do reda 10¹⁹cm⁻³ dovodi do efekata maksvelijanizacije neravnotežne funkcije raspodele, ali postoji značajno odstupanje visokoenergijskog repa raspodele u odnosu na rep ravnotežne

raspodele, posebno iznad praga za ekscitaciju helijuma. Prikazan je uticaj koncentracije elektrona na apsolutne prinose procesa proizvodnje i gašenja bitnih reaktivnih vrsta $O_2(^1\Delta)$, NO, H i O_2^- .

Model je proširen uključivanjem jednačine za proračun temperature elektrona tokom vremena, samousaglašeno sa proračunom koncentracije čestica i rezultati su prikazani u Poglavlju 7. Takođe, dato je poređenje rezultata modela sa rezultatima iz literature dobijenim u sličnim uslovima. Pokazano je da se izračunata vrednost temperature elektrona u odgovarajućem intervalu gustine apsorbirane snage dobro slaže sa podacima iz literature. Analiziran je uticaj koncentracije elektrona i gustine snage na temperaturu elektrona. Analiziran je i uticaj temperature elektrona na hemijski sastav i vremensku evoluciju svih komponenata plazme. Pokazano je da se u ovom slučaju najizraženije razlike u koncentraciji javljaju kod metastabila He^* , He_2^* , jona He^+ , He_2^+ , O^+ , O_2^+ , N_4^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , kao i neutrala O, OH i O_3 . Diskutovane su promene u hemijskoj kinetici ovih čestica do kojih dovodi drugačiji model za proračun temperature elektrona.

Poglavlje 8 sadrži analizu relevantnih procesa proizvodnje i gašenja OH radikala za slučaj impulsnog DC plazma mlaza u helijumu, sa variranim udelima vazduha i vodene pare. Rezultati su dobijeni na osnovu globalnog modela koji uključuje 68 vrsta povezanih sa 1425 reakcija i poređeni su sa rezultatima fluidnog modela iz literature za plazma mlaz iste konfiguracije. Obzirom da pražnjenje ima brz prostorni i vremenski razvoj, proračun globalnim modelom vršen je za različite vrednosti udela vazduha, vodene pare, koncentracije i temperature elektrona, pri čemu su ove vrednosti kao ulazni parametri procenjene na osnovu rezultata fluidnog modela iz literature. Analiziran je uticaj ovih parametara na koncentraciju OH radikala. Pokazano je da se rezultati globalnog modela bolje slažu sa rezultatima fluidnog ukoliko se proračun vrši sa koeficijentima brzine elektronskih sudarnih procesa dobijenim na osnovu neravnotežne funkcije raspodele elektrona po energiji. Takođe, pokazano je da se pomoću globalnog modela mogu efikasno odrediti svi značajni procesi proizvodnje i gašenja za svaku uključenu vrstu čestica, sa akcentom na analizu hemijske kinetike OH radikala. Analiziran je uticaj temperature elektrona na apsolutne prinose i procentualne doprinose u proizvodnji i gašenju OH radikala. Pokazano je da pri udelima vodene pare u smeši reda 100ppm H_2O na srednjim energijama elektrona u intervalu 1-3eV ulogu

glavnih procesa proizvodnje OH ima disocijacija molekula H_2O u reakciji sa pobuđenim atomima kiseonika $\text{O}(^1\text{D})$ i $\text{O}(^1\text{S})$, a ne disocijacija elektronskim udarom. Na većim srednjim energijama elektrona 5-9eV na proizvodnju OH radikala bitno utiču joni H_2O^+ kroz proces konverzije u jone H_3O^+ sa molekulima H_2O , kao i kroz rekombinacije sa elektronima. U gašenju OH na manjim energijama bitno utiče disocijacija elektronskim udarom, dok na većim energijama postaju značajne hemijske reakcije sa atomima N i O usled pojačane disocijacije molekula O_2 i N_2 , kao i rekombinacije sa jonima He^+ i N^+ zbog pojačane jonizacije. Pored toga, analiziran je uticaj koncentracije vodene pare u smeši na hemijski sastav plazme i posebno na hemijsku kinetiku važnih reaktivnih čestica H, OH, H_2O^+ , H_2 , HO_2 , H_2O_2 , NO, NO_2 , NO_3 , HNO_2 i HNO_3 . Prikazane su šeme sa najznačajnijim procesima proizvodnje i gašenja navedenih čestica, određene na osnovu globalnog modela za vremenske intervale proračuna od 30ns i 5ms.

U Poglavlju 9 prikazani su rezultati proširenog globalnog modela, dobijenog uključivanjem jednačina za samousaglašeni proračun temperature i koncentracije elektrona sa koncentracijama svih komponenata plazme, kao i zapreminskog protoka gasa. Koeficijenti brzine za sve elektronske sudarne procese izračunati su pomoću programa BOLSIG+ na osnovu baza preseka LXCat i Quantemol-DB. Model uključuje 73 vrste čestica međusobno povezanih sa 1408 fizičkih i hemijskih procesa. Model je verifikovan u proceduri modelovanja eksperimentalnih rezultata dobijenih masenom analizom sastava smeše koju generiše plazma mlaz u helijumu, u prostoru ispunjenom vlažnim vazduhom. U Laboratoriji za gasnu elektroniku, na Institutu za fiziku Univerziteta u Beogradu, formiran je plazma mlaz u helijumu i eksperimentalna dijagnostika hemijskog sastava plazme izvršena je merenjem masenog spektra pozitivnih jona pomoću MBMS spektrometra. Određivanje početnih uslova za proračun i poređenje sa eksperimentom, poput udela vazduha u plazmi, brzine protoka gasa, kao i gustine apsorbovane snage za proračun temperature elektrona, izvršeno je na osnovu merenja u navedenom eksperimentu kao i podataka iz literature za slične eksperimente. Analiziran je uticaj udela vazduha (1-10%) i vodene pare (20ppm-10000ppm) na funkciju raspodele elektrona po energiji i koeficijente brzine, kao i na hemijski sastav plazme sa akcentom na koncentracije pozitivnih jona. Pokazano je da veći udeo vazduha značajno snižava rep funkcije raspodele kao i srednju energiju elektrona, dok je uticaj vodene pare na funkciju raspodele pri konstantnom udelu vazduha manje izražen.

U cilju analize uticaja vazduha na koncentraciju jona izvršen je proračun za 0,5%, 1%, 1,5% i 2% vazduha u smeši. Pokazano je da povećanje udela prevashodno snižava koncentraciju elektrona usled veće koncentracije kiseonika i izraženijeg zahvata, dok se temperatura elektrona smanjuje zbog izraženijih gubitaka energije u procesima rasejanja na molekulima N_2 i O_2 . Najbolja reprodukcija masenog spektra jona globalnim modelom postiže se za 1% vazduha, što takođe odgovara vrednosti procenjenoj na osnovu LIF merenja iz literature, pri 7600ppm vodene pare.

Analiziran je uticaj vodene pare na koncentraciju i temperaturu elektrona. Pokazano je da čak i kada je koncentracija vodene pare u smeši manja od koncentracije kiseonika, na potrošnju elektrona glavni uticaj imaju procesi disocijativnog zahvata elektrona na molekulima H_2O . Prisustvo vodene pare bitno utiče na povećanje elektronegativnosti plazme, što dovodi do smanjenja koncentracije elektrona ispod 10^{10}cm^{-3} i povećanja temperature iznad 3eV. Pri tom, najznačajniji proces zahvata proizvodi jone H^+ , koji se u prisustvu molekula H_2O efikasno konvertuju u jone OH^- . Prikazana je detaljna analiza balansa koncentracije i srednje energije elektrona. Pokazano je da vodena para bitno utiče na temperaturu elektrona preko vibracionih ekscitacija u modove (100-001) i (010), kao i disocijacija u stanja $OH(X)$ i $OH(A)$, značajnih procesa proizvodnje OH radikala. Pokazano je da su apsolutni prinosi ovih procesa u potrošnji energije elektrona uporedivi sa prinosima vibracionih ekscitacija molekula N_2 i disocijacija molekula O_2 , kao i da mogu biti značajniji u zavisnosti od sastava smeše.

U modelu je izvršena detaljna analiza relevantnih procesa proizvodnje i gašenja za sve uključene vrste čestica, pozitivne jone, negativne jone i reaktivne neutrane. Takođe, analiziran je uticaj udela vodene pare na apsolutne prinose ovih procesa i hemijski sastav plazme, kao i na koncentraciju i temperaturu elektrona. Glavni procesi proizvodnje i gašenja su šematski prikazani za vremenske intervale od jedne mikrosekunde i pet milisekundi, kako bi se diskutovale razlike u hemijskoj kinetici najvažnijih čestica, između primarnih procesa koji inicijalno dolaze do izražaja i hemijskih reakcija koje se mogu javiti sa povećanjem kompleksnosti hemijskog sastava plazme.

PRILOG 1

Tabela 13. Lista procesa uključenih u globalni model sa proračunom koncentracije i temperature elektrona, kao i zapreminskog protoka gasa. Koeficijenti brzine dvočestičnih procesa izraženi u jedinici [cm^3s^{-1}]. Koeficijenti brzine tročestičnih procesa izraženi u jedinici [cm^6s^{-1}]. T_e u jedinici [eV], $T_{eg}=T_e[\text{eV}]/T_g^e[\text{eV}]$. *: vrednost procenjena iz citirane reference. Reference su numerisane zbog konciznosti.

Br.	Proces	Koeficijent brzine, prag [eV]	Ref.
Elastični prenos impulsa			
1.	$e^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + e^-$	$k(T_e)$, 0,0	[119]*
2.	$e^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + e^-$	$k(T_e)$, 0,0	[76]
3.	$e^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + e^-$	$k(T_e)$, 0,0	[77]
4.	$e^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + e^-$	$k(T_e)$, 0,0	[78]
Disocijacija elektronskim udarom			
5.	$e^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O} + e^-$	$k(T_e)$, 4,6	[175]
6.	$e^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + e^-$	$k(T_e)$, 6,1	[175]
7.	$e^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{S}) + e^-$	$k(T_e)$, 8,0	[175,123]*
8.	$e^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + \text{O}(^1\text{D}) + e^-$	$k(T_e)$, 8,0	[175,123]*
9.	$e^- + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O} + \text{O} + e^-$	$k(T_e)$, 3,6	[175]
10.	$e^- + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + e^-$	$k(T_e)$, 5,12	[175]
11.	$e^- + \text{O}_2(^1\Sigma) \rightarrow \text{O} + \text{O} + e^-$	$k(T_e)$, 2,96	[175]
12.	$e^- + \text{O}_2(^1\Sigma) \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + e^-$	$k(T_e)$, 4,46	[175]
13.	$e^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N} + e^-$	$k(T_e)$, 9,7	[175]
14.	$e^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N}(^2\text{D}) + e^-$	$k(T_e)$, 12,5	[175,123]*
15.	$e^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N}(^2\text{P}) + e^-$	$k(T_e)$, 14,5	[175,123]*
16.	$e^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}(\text{X}) + e^-$	$k(T_e)$, 7,6	[175]
17.	$e^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}(\text{X}) + e^-$	$k(T_e)$, 9,0	[175]
Elektronska i vibraciona ekscitacija elektronskim udarom			
18.	$e^- + \text{He} \rightarrow \text{He}^* + e^-$	$k(T_e)$, 19,8	[175]
19.	$e^- + \text{O} \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + e^-$	$k(T_e)$, 2,0	[175]

20.	$e^- + O \rightarrow O(^1S) + e^-$	$k(T_e)$, 4,19	[175]
21.	$e^- + N \rightarrow N(^2D) + e^-$	$k(T_e)$, 2,38	[175]
22.	$e^- + N \rightarrow N(^2P) + e^-$	$k(T_e)$, 3,57	[175]
23.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	$k(T_e)$, 0,98	[175]
24.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	$k(T_e)$, 1,64	[175]
25.	$e^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	$k(T_e)$, 0,7	[175]
26.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(v=1) + e^-$	$k(T_e)$, 0,19	[175]
27.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(v=2) + e^-$	$k(T_e)$, 0,56	[175]
28.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(v=3) + e^-$	$k(T_e)$, 0,57	[175]
29.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2(v=4) + e^-$	$k(T_e)$, 0,75	[175]
30.	$e^- + N_2 \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	$k(T_e)$, 0,29	[175]
31.	$e^- + N_2 \rightarrow N_2(v=2) + e^-$	$k(T_e)$, 0,59	[175]
32.	$e^- + N_2 \rightarrow N_2(v=3) + e^-$	$k(T_e)$, 0,88	[175]
33.	$e^- + N_2 \rightarrow N_2(v=4) + e^-$	$k(T_e)$, 1,17	[175]
34.	$e^- + H_2O \rightarrow H_2O(100-001) + e^-$	$k(T_e)$, 0,5	[175]
35.	$e^- + H_2O \rightarrow H_2O(010) + e^-$	$k(T_e)$, 0,3	[175]
36.	$e^- + O_2(v=1) \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	$k(T_e)$, 0,79	[123]
37.	$e^- + O_2(v=1) \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	$k(T_e)$, 1,45	[123]
38.	$e^- + O_2(v=2) \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	$k(T_e)$, 0,6	[123]
39.	$e^- + O_2(v=3) \rightarrow O_2 + e^-$	$k(T_e)$, 1,26	[123]
40.	$e^- + O_2(v=3) \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	$k(T_e)$, 0,41	[123]
41.	$e^- + O_2(v=3) \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	$k(T_e)$, 1,07	[123]
42.	$e^- + O_2(v=4) \rightarrow O_2(^1\Delta) + e^-$	$k(T_e)$, 0,23	[123]
43.	$e^- + O_2(v=4) \rightarrow O_2(^1\Sigma) + e^-$	$k(T_e)$, 0,89	[123]
44.	$e^- + N_2(v=1) \rightarrow N_2(v=2) + e^-$	$k(T_e)$, 0,43	[123]
45.	$e^- + N_2(v=1) \rightarrow N_2(v=3) + e^-$	$k(T_e)$, 0,6	[123]
46.	$e^- + N_2(v=1) \rightarrow N_2(v=4) + e^-$	$k(T_e)$, 0,8	[123]

Jonizacija i disocijativna jonizacija elektronskim udarom

47.	$e^- + He \rightarrow He^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 24,6	[175]
48.	$e^- + He^* \rightarrow He^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 4,78	[175]
49.	$e^- + O \rightarrow O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 13,62	[175]
50.	$e^- + N \rightarrow N^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 14,5	[175]

51.	$e^- + O(^1D) \rightarrow O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 11,7	[175]
52.	$e^- + O(^1S) \rightarrow O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 9,0	[175,123]*
53.	$e^- + O_2 \rightarrow O_2^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 12,06	[175]
54.	$e^- + O_2 \rightarrow O + O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 17,0	[175]
55.	$e^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 11,08	[175]
56.	$e^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 16,0	[175]
57.	$e^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 10,43	[175]
58.	$e^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O + O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 15,36	[175,123]*
59.	$e^- + N_2 \rightarrow N_2^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 15,5	[175]
60.	$e^- + N_2 \rightarrow N + N^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 24,34	[175]
61.	$e^- + H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 13,5	[175]
62.	$e^- + NO \rightarrow NO^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 9,3	[175]
63.	$e^- + NO \rightarrow N + O^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 20,25	[175]
64.	$e^- + NO \rightarrow O + N^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 21,1	[175]
65.	$e^- + NO_2 \rightarrow NO_2^+ + e^- + e^-$	$k(T_e)$, 16,8	[175]

Disocijativni zahvat elektrona

66.	$e^- + O_2 \rightarrow O + O^-$	$k(T_e)$, 5,38	[175]
67.	$e^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O^-$	$k(T_e)$, 3,5	[175]
68.	$e^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O(^1D) + O^-$	$k(T_e)$, 5,5	[175,123]*
69.	$e^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O + O^-$	$k(T_e)$, 2,85	[175]
70.	$e^- + O_3 \rightarrow O + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,25	[175]
71.	$e^- + O_3 \rightarrow O_2 + O^-$	$k(T_e)$, 0,025	[175]
72.	$e^- + H_2O \rightarrow H_2 + O^-$	$k(T_e)$, 4,43	[175]
73.	$e^- + H_2O \rightarrow OH + H^-$	$k(T_e)$, 5,30	[175]
74.	$e^- + H_2O \rightarrow H + OH^-$	$k(T_e)$, 4,30	[175]

Tročestični zahvat elektrona

75.	$e^- + O_2 + O_2 \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119]*
76.	$e^- + He + O_2 \rightarrow He + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
77.	$e^- + O + O_2 \rightarrow O + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
78.	$e^- + O_2 + O_2 \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
79.	$e^- + O_2 + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
80.	$e^- + O_2 + O_2(v=1) \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*

81.	$e^- + O_2 + O_2(v=2) \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
82.	$e^- + O_2 + O_2(v=3) \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
83.	$e^- + O_2 + O_2(v=4) \rightarrow O_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
84.	$e^- + O_2 + N_2 \rightarrow N_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
85.	$e^- + O_2 + CO_2 \rightarrow CO_2 + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*
86.	$e^- + O_2 + H_2O \rightarrow H_2O + O_2^-$	$k(T_e)$, 0,073	[119,87]*

Superelastični sudar sa elektronom

87.	$e^- + He^* \rightarrow e^- + He$	$7,0 \cdot 10^{-10} T_{eg}^{0,5}$, -19,8	[123]
88.	$e^- + O(^1D) \rightarrow e^- + O$	$8,17 \cdot 10^{-9} e^{-0,4/T_e}$, -1,97	[123]
89.	$e^- + N(^2D) \rightarrow N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-8} T_e^{-0,36} e^{-0,83/T_e}$, -2,38	[123]
90.	$e^- + N(^2P) \rightarrow N + e^-$	$5,45 \cdot 10^{-9} T_e^{-0,41} e^{-1,05/T_e}$, -3,57	[123]
91.	$e^- + N(^2P) \rightarrow N(^2D) + e^-$	$1,63 \cdot 10^{-8} T_e^{-0,17} e^{-2,69/T_e}$, -1,19	[123]
92.	$e^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow e^- + O_2$	$k(T_e)$, -0,98	[175]
93.	$e^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow e^- + O_2$	$k(T_e)$, -1,64	[175]
94.	$e^- + O_2(v=1) \rightarrow O_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,19	[123]
95.	$e^- + O_2(v=2) \rightarrow O_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,56	[123]
96.	$e^- + O_2(v=3) \rightarrow O_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,57	[123]
97.	$e^- + O_2(v=4) \rightarrow O_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,75	[123]
98.	$e^- + N_2(v=1) \rightarrow N_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,29	[123]
99.	$e^- + N_2(v=2) \rightarrow N_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,59	[123]
100.	$e^- + N_2(v=3) \rightarrow N_2 + e^-$	$k(T_e)$, -0,88	[123]
101.	$e^- + N_2(v=4) \rightarrow N_2 + e^-$	$k(T_e)$, -1,17	[123]
102.	$e^- + N_2(v=2) \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	$k(T_e)$, -0,43*	[123]
103.	$e^- + N_2(v=3) \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	$k(T_e)$, -0,6*	[123]
104.	$e^- + N_2(v=4) \rightarrow N_2(v=1) + e^-$	$k(T_e)$, -0,8*	[123]

Elektron-jonske rekombinacije

105.	$e^- + He^+ \rightarrow He$	$2,0 \cdot 10^{-12}$, 0,0	[123]
106.	$e^- + He^+ \rightarrow He^*$	$6,76 \cdot 10^{-13} T_e^{-0,5}$	[123]
107.	$e^- + He_2^+ \rightarrow He + He$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	[123]
108.	$e^- + He_2^+ \rightarrow He + He^*$	$8,9 \cdot 10^{-9} T_{eg}^{-1,5}$	[123]
109.	$e^- + He_2^+ \rightarrow He_2^*$	$1,5 \cdot 10^{-16}$, 0,0	[123]
110.	$e^- + O^+ \rightarrow O$	$4,0 \cdot 10^{-12}$, 0,0	[123]

111.	$e^- + O^+ \rightarrow O(^1D)$	$5,3 \cdot 10^{-13} T_e^{-0,5}$, 0,0	[123]
112.	$e^- + O_2^+ \rightarrow O + O(^1D)$	$8,67 \cdot 10^{-9} T_e^{-0,7}$, 0,0	[123]
113.	$e^- + O_2^+ \rightarrow O(^1D) + O(^1D)$	$6,87 \cdot 10^{-9} T_e^{-0,7}$, 0,0	[123]
114.	$e^- + O_2^+ \rightarrow O_2$	$4,0 \cdot 10^{-12}$, 0,0	[123]
115.	$e^- + O_2^+ \rightarrow O + O$	$2,1 \cdot 10^{-7} T_{eg}^{-0,63}$, 0,0	[123]
116.	$e^- + O_4^+ \rightarrow O_2 + O_2$	$2,25 \cdot 10^{-7} T_e^{-0,5}$, 0,0	[123]
117.	$e^- + O_4^+ \rightarrow O + O + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-6} T_{eg}^{-1,0}$, 0,0	[123]
118.	$e^- + N^+ \rightarrow N$	$3,5 \cdot 10^{-12}$, 0,0	[123]
119.	$e^- + N_2^+ \rightarrow N_2$	$4,8 \cdot 10^{-7} T_{eg}^{-0,5}$, 0,0	[123]
120.	$e^- + N_2^+ \rightarrow N + N$	$2,8 \cdot 10^{-7} T_{eg}^{-0,5}$, 0,0	[123]
121.	$e^- + N_2^+ \rightarrow N + N(^2D)$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_{eg}^{-0,5}$, 0,0	[123]
122.	$e^- + N_4^+ \rightarrow N_2 + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-6} T_{eg}^{-0,5}$, 0,0	[123]
123.	$e^- + N_4^+ \rightarrow N + N + N_2$	$3,13 \cdot 10^{-7} T_e^{-0,41}$, 0,0	[123]
124.	$e^- + NO^+ \rightarrow NO$	$4,0 \cdot 10^{-12}$, 0,0	[123]
125.	$e^- + NO^+ \rightarrow O + N$	$4,0 \cdot 10^{-7} T_{eg}^{-0,4}$, 0,0	[123]
126.	$e^- + NO^+ \rightarrow O + N(^2D)$	$3,0 \cdot 10^{-7} T_{eg}^{-1,0}$, 0,0	[123]
127.	$e^- + H_2O^+ \rightarrow O + H + H$	$1,73 \cdot 10^{-7}$, 0,0	[123]
128.	$e^- + H_2O^+ \rightarrow H + OH$	$3,8 \cdot 10^{-7}$, 0,0	[123]
129.	$e^- + H_3O^+ \rightarrow H + H_2O$	$1,3 \cdot 10^{-6} T_{eg}^{-1,0}$, 0,0	[123]
130.	$2e^- + He^+ \rightarrow He + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
131.	$2e^- + He^+ \rightarrow He^* + e^-$	$6,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,0}$, 0,0	[123]
132.	$e^- + He + He^+ \rightarrow He + He^*$	$1,0 \cdot 10^{-27}$, 0,0	[123]
133.	$2e^- + He_2^+ \rightarrow He + He + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
134.	$2e^- + He_2^+ \rightarrow He + He^* + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,0}$, 0,0	[123]
135.	$2e^- + He_2^+ \rightarrow He_2^* + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,0}$, 0,0	[123]
136.	$e^- + He_2^+ + He \rightarrow He + He + He$	$2,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-2,5}$, 0,0	[123]
137.	$e^- + He + He_2^+ \rightarrow He + He + He^*$	$5,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,0}$, 0,0	[123]
138.	$e^- + He + He_2^+ \rightarrow He + He_2^*$	$1,5 \cdot 10^{-27}$, 0,0	[123]
139.	$e^- + N^+ + He \rightarrow He + N$	$2,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-2,5}$, 0,0	[123]
140.	$e^- + N^+ + N_2 \rightarrow N + N_2$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-2,5}$, 0,0	[123]
141.	$e^- + N^+ + O_2 \rightarrow O_2 + N$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
142.	$2e^- + N^+ \rightarrow N + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]

143.	$e^- + O^+ + He \rightarrow He + O$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-2,5}$, 0,0	[123]
144.	$e^- + O^+ + N_2 \rightarrow O + N_2$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
145.	$e^- + O^+ + O_2 \rightarrow O + O_2$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-2,5}$, 0,0	[123]
146.	$2e^- + O^+ \rightarrow O + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
147.	$2e^- + O^+ \rightarrow O(^1D) + e^-$	$5,12 \cdot 10^{-27} T_e^{-4,5}$, 0,0	[123]
148.	$e^- + N_2^+ + N_2 \rightarrow N_2 + N_2$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
149.	$e^- + N_2^+ + O_2 \rightarrow O_2 + N_2$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
150.	$2e^- + N_2^+ \rightarrow N_2 + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
151.	$e^- + O_2^+ + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
152.	$e^- + O_2^+ + O_2 \rightarrow O_2 + O_2$	$2,49 \cdot 10^{-29} T_e^{-1,5}$, 0,0	[123]
153.	$2e^- + O_2^+ \rightarrow O_2 + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
154.	$2e^- + O_4^+ \rightarrow O_2 + O_2 + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
155.	$2e^- + N_4^+ \rightarrow N_2 + N_2 + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
156.	$2e^- + H_3O^+ \rightarrow H + H_2O + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
157.	$e^- + NO^+ + O_2 \rightarrow O_2 + NO$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
158.	$e^- + NO^+ + N_2 \rightarrow N_2 + NO$	$6,0 \cdot 10^{-27} T_{eg}^{-1,5}$, 0,0	[123]
159.	$2e^- + NO^+ \rightarrow NO + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
160.	$2e^- + O_2^+ \cdot H_2O \rightarrow O_2 + H_2O + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
161.	$2e^- + H_3O^+ \cdot OH \rightarrow H + OH + H_2O + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]
162.	$2e^- + H_3O^+ \cdot H_2O \rightarrow H + H_2O + H_2O + e^-$	$7,0 \cdot 10^{-20} T_{eg}^{-4,5}$, 0,0	[123]

Reakcije pozitivnih jona sa neutralima u osnovnom stanju

163.	$He^+ + O \rightarrow He + O^+$	$5,0 \cdot 10^{-11} T_0^{0,5}$	[123]
164.	$He^+ + O_2 \rightarrow He + O_2^+$	$3,3 \cdot 10^{-11} T_0^{0,5}$	[123]
165.	$He^+ + O_3 \rightarrow He + O_2 + O^+$	$1,07 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
166.	$He^+ + NO \rightarrow He + O + N^+$	$1,25 \cdot 10^{-9}$	[123]
167.	$He^+ + NO \rightarrow He + NO^+$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	[123]
168.	$He^+ + OH \rightarrow He + H + O^+$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	[123]
169.	$He_2^+ + O \rightarrow He + He + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
170.	$He_2^+ + O_2 \rightarrow He + He + O + O^+$	$1,05 \cdot 10^{-9}$	[123]
171.	$He_2^+ + O_2 \rightarrow He + He + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
172.	$He_2^+ + O_3 \rightarrow He + He + O_2 + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
173.	$He_2^+ + NO \rightarrow He + He + NO^+$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	[123]

174.	$\text{He}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{N}_2^+$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	[123]
175.	$\text{He}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{He}_2^* + \text{N}_2^+$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	[123]
176.	$\text{He}_2^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}^+ + \text{H}_2$	$2,1 \cdot 10^{-10}$	[123]
177.	$\text{O}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O} + \text{O}^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{-0,5}$	[123]
178.	$\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2^+$	$2,0 \cdot 10^{-11} T_0^{-0,4}$	[123]
179.	$\text{O}^+ + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
180.	$\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{NO}^+$	$2,4 \cdot 10^{-11}$	[123]
181.	$\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{O}_2^+$	$3,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
182.	$\text{O}^+ + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
183.	$\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{NO}^+$	$3,0 \cdot 10^{-12} e^{-0,003117g}$	[123]
184.	$\text{O}^+ + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
185.	$\text{O}^+ + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
186.	$\text{O}^+ + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2\text{O}^+ + \text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
187.	$\text{O}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{H} + \text{O}_2^+$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
188.	$\text{O}_2^+ + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}^+$	$3,0 \cdot 10^{-17}$	[123]
189.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{-0,5}$	[123]
190.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_4^+$	$4,0 \cdot 10^{-30} T_0^{-2,9}$	[123]
191.	$\text{O}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{O} + \text{NO}^+$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	[123]
192.	$\text{O}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	$4,4 \cdot 10^{-10}$	[123]
193.	$\text{O}_2^+ + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
194.	$\text{O}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-17}$	[123]
195.	$\text{O}_4^+ + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2^+$	$3,0 \cdot 10^{-17}$	[123]
196.	$\text{O}_4^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}_3 + \text{O}_2^+$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
197.	$\text{O}_4^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2^+$	$3,3 \cdot 10^{-16} T_0^{-4,0} e^{-5030/Tg}$	[123]
198.	$\text{O}_4^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
199.	$\text{O}_4^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-5} T_0^{-4,2} e^{-5400/Tg}$	[123]
200.	$\text{O}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	[123]
201.	$\text{N}^+ + \text{O} \rightarrow \text{N} + \text{O}^+$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[175]
202.	$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{NO}^+$	$6,1 \cdot 10^{-10}$	[3]
203.	$\text{N}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N} + \text{O}_2^+$	$6,1 \cdot 10^{-10}$	[3]
204.	$\text{N}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	[175]
205.	$\text{N}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_3^+$	$9,62 \cdot 10^{-10}$	[175]

206.	$\text{N}^+ + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
207.	$\text{N}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{N}_2^+$	$8,33 \cdot 10^{-11}$	[175]
208.	$\text{N}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N} + \text{NO}^+$	$8,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
209.	$\text{N}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}^+$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
210.	$\text{N}^+ + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
211.	$\text{N}^+ + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$5,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
212.	$\text{N}^+ + \text{OH} \rightarrow \text{H} + \text{NO}^+$	$3,4 \cdot 10^{-10}$	[123]
213.	$\text{N}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N} + \text{H}_2\text{O}^+$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	[123]
214.	$\text{N}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{H}_2$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	[175]
215.	$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N} + \text{NO}^+$	$1,3 \cdot 10^{-10} T_0^{-0,46}$	[123]
216.	$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}^+$	$1,0 \cdot 10^{-11} T_0^{-0,2}$	[123]
217.	$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}({}^2\text{D}) + \text{NO}^+$	$1,8 \cdot 10^{-10} T_0^{-1,0}$	[123]
218.	$\text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}({}^2\text{P}) + \text{NO}^+$	$1,8 \cdot 10^{-10} T_0^{-1,0}$	[123]
219.	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-17}$	[123]
220.	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$5,0 \cdot 10^{-11} T_0^{-0,8}$	[123]
221.	$\text{N}_2^+ + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
222.	$\text{N}_2^+ + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}^+$	$2,4 \cdot 10^{-15} T_g$	[123]
223.	$\text{N}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
224.	$\text{N}_2^+ + \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{NO}^+$	$5,9 \cdot 10^{-11}$	[123]
225.	$\text{N}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_4^+$	$6,2 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,7}$	[123]
226.	$\text{N}_2^+ + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N} + \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
227.	$\text{N}_4^+ + \text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{O}^+$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
228.	$\text{N}_4^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{N}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[87]*
229.	$\text{N}_4^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	[87]
230.	$\text{N}_4^+ + \text{N} \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{N}^+$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
231.	$\text{N}_4^+ + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
232.	$\text{N}_4^+ + \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2\text{O} + \text{NO}^+$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
233.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^+$	$4,1 \cdot 10^{-10}$	[123]
234.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}^+$	$5,9 \cdot 10^{-10}$	[123]
235.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_3\text{O}^+$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	[123]
236.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{H}_2$	$5,5 \cdot 10^{-11}$	[123]
237.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{N} \rightarrow \text{H}_2 + \text{NO}^+$	$1,9 \cdot 10^{-10}$	[123]

238.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}_3\text{O}^+$	$7,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
239.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}^+$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	[123]
240.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$4,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
241.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{N} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{H} + \text{H}_2$	$1,9 \cdot 10^{-10}$	[123]
242.	$\text{NO}_2^+ + \text{NO} \rightarrow \text{NO}^+ + \text{NO}_2$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	[123]
243.	$\text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_4^+$	$2,0 \cdot 10^{-10} e^{-2300/T_g}$	[123]
244.	$\text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}^+$	$5,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
245.	$\text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	[123]
246.	$\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$9,0 \cdot 10^{-10}$	[27]
247.	$\text{He}^+ + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He}_2^+$	$6,6 \cdot 10^{-32}$	[123]
248.	$\text{O}^+ + \text{He} + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-29} T_0^{0,5}$	[123]
249.	$\text{O}^+ + \text{He} + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{N} + \text{NO}^+$	$6,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-2,0}$	[123]
250.	$\text{O}^+ + \text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-29} T_0^{0,5}$	[123]
251.	$\text{O}^+ + \text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
252.	$\text{O}^+ + \text{O}_2 + \text{N} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
253.	$\text{O}^+ + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N} + \text{NO}^+$	$6,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-2,0}$	[123]
254.	$\text{O}^+ + \text{N} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
255.	$\text{O}^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$6,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-2,0}$	[123]
256.	$\text{O}_2^+ + \text{He} + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_4^+$	$3,9 \cdot 10^{-30} T_0^{-3,2}$	[123]
257.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_4^+$	$3,9 \cdot 10^{-30} T_0^{-3,2}$	[123]
258.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_4^+$	$5,5 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,7}$	[123]
259.	$\text{O}_2^+ + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-28} T_0^{-2,0}$	[164,2]*
260.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-28} T_0^{-2,0}$	[164,2]*
261.	$\text{O}_2^+ + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-28} T_0^{-2,0}$	[164,2]*
262.	$\text{O}_2^+ + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-28} T_0^{-2,0}$	[164,2]*
263.	$\text{O}_4^+ + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-28} T_0^{-2,0}$	[164,2]*
264.	$\text{N}^+ + \text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
265.	$\text{N}^+ + \text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
266.	$\text{N}^+ + \text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
267.	$\text{N}^+ + \text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
268.	$\text{N}^+ + \text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
269.	$\text{N}^+ + \text{O}_2 + \text{N} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]

270.	$N^+ + N + He \rightarrow N_2^+ + He$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
271.	$N^+ + N + N_2 \rightarrow N_2^+ + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
272.	$N^+ + N + O_2 \rightarrow N_2^+ + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
273.	$N^+ + N + H_2O \rightarrow N_2^+ + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
274.	$N^+ + N_2 + M \rightarrow N_3^+ + M$	$9,0 \cdot 10^{-30} e^{-400/Tg}$	[175]
275.	$N_2^+ + He + N_2 \rightarrow He + N_4^+$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
276.	$N_2^+ + N_2 + N_2 \rightarrow N_2 + N_4^+$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
277.	$N_2^+ + O_2 + N_2 \rightarrow O_2 + N_4^+$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
278.	$H_3O^+ + He + H_2O \rightarrow He + H_3O^+ \cdot H_2O$	$14,4 \cdot 10^{-28}$	[3]*
279.	$H_3O^+ + O_2 + H_2O \rightarrow O_2 + H_3O^+ \cdot H_2O$	$3,7 \cdot 10^{-27}$	[123]
280.	$H_3O^+ + N_2 + H_2O \rightarrow N_2 + H_3O^+ \cdot H_2O$	$3,4 \cdot 10^{-27} T_0^{-4,0}$	[123]
281.	$H_3O^+ + H_2O + H_2O \rightarrow H_2O + H_3O^+ \cdot H_2O$	$7,0 \cdot 10^{-28}$	[123]

Reakcije pozitivnih jona sa neutralima u pobuđenom stanju

282.	$He^+ + O(^1D) \rightarrow He + O^+$	$5,0 \cdot 10^{-11} T_0^{0,5}$	[123]
283.	$He^+ + O(^1S) \rightarrow He + O^+$	$5,0 \cdot 10^{-11} T_0^{0,5}$	[123]
284.	$He^+ + O_2(^1\Delta) \rightarrow He + O + O^+$	$1,07 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
285.	$He^+ + O_2(^1\Delta) \rightarrow He + O_2^+$	$3,3 \cdot 10^{-11} T_0^{0,5}$	[123]
286.	$He_2^+ + He^* \rightarrow He + He + He^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
287.	$He_2^+ + O(^1D) \rightarrow He + He + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
288.	$He_2^+ + O(^1S) \rightarrow He + He + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
289.	$He_2^+ + O_2(^1\Delta) \rightarrow He + He + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
290.	$He_2^+ + O_2(^1\Sigma) \rightarrow He + He + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-9} T_0^{0,5}$	[123]
291.	$O^+ + N(^2D) \rightarrow O + N^+$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
292.	$O^+ + N(^2P) \rightarrow O + N^+$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
293.	$O^+ + N_2(v=1) \rightarrow N + NO^+$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
294.	$O^+ + N_2(v=2) \rightarrow N + NO^+$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
295.	$O^+ + N_2(v=3) \rightarrow N + NO^+$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
296.	$O^+ + N_2(v=4) \rightarrow N + NO^+$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
297.	$O_2^+ + He^* \rightarrow He + O + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-20}$	[123]
298.	$O_2^+ + He_2^* \rightarrow He + He + O + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
299.	$O_2^+ + O(^1D) \rightarrow O_2(^1\Delta) + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-12} T_0^{-0,5}$	[123]
300.	$O_4^+ + He^* \rightarrow He + O_2 + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

301.	$O_4^+ + He^* \rightarrow He + He + O + O_2 + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
302.	$O_4^+ + O(^1D) \rightarrow O + O_2 + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
303.	$O_4^+ + O(^1D) \rightarrow O_3 + O_2^+$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
304.	$O_4^+ + O(^1S) \rightarrow O + O_2 + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
305.	$O_4^+ + O(^1S) \rightarrow O_3 + O_2^+$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
306.	$O_4^+ + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2 + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
307.	$O_4^+ + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
308.	$O_4^+ + N(^2P) \rightarrow O_2 + N + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
309.	$NO^+ + He^* \rightarrow He + O + N^+$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
310.	$NO^+ + He^* \rightarrow He + N + O^+$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
311.	$N_2^+ + He^* \rightarrow He + N + N^+$	$1,0 \cdot 10^{-20}$	[123]
312.	$N_4^+ + He^* \rightarrow He + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
313.	$N_4^+ + O(^1S) \rightarrow O + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
314.	$N_4^+ + O(^1D) \rightarrow O + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
315.	$N_4^+ + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
316.	$N_4^+ + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
317.	$N_4^+ + N(^2D) \rightarrow N + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
318.	$N_4^+ + N(^2P) \rightarrow N + N_2 + N_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
319.	$H_2O^+ + He^* \rightarrow He + H + H + O^+$	$1,0 \cdot 10^{-20}$	[123]
320.	$H_3O^+ + He^* \rightarrow He + H + H_2O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
321.	$O_2^+ \cdot H_2O + He^* \rightarrow He + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
322.	$O_2^+ \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
323.	$O_2^+ \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
324.	$O_2^+ \cdot H_2O + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
325.	$O_2^+ \cdot H_2O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
326.	$O_2^+ \cdot H_2O + N(^2D) \rightarrow N + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
327.	$O_2^+ \cdot H_2O + N(^2P) \rightarrow N + H_2O + O_2^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
328.	$H_3O^+ \cdot OH + He^* \rightarrow He + OH + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
329.	$H_3O^+ \cdot OH + O(^1D) \rightarrow O + OH + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
330.	$H_3O^+ \cdot OH + O(^1S) \rightarrow O + OH + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
331.	$H_3O^+ \cdot OH + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + OH + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
332.	$H_3O^+ \cdot OH + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + OH + H_3O^+$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

333.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{OH} + \text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{N} + \text{OH} + \text{H}_3\text{O}^+$	$1,0\cdot 10^{-10}$	[123]
334.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{OH} + \text{N}(^2\text{P}) \rightarrow \text{N} + \text{OH} + \text{H}_3\text{O}^+$	$1,0\cdot 10^{-10}$	[123]
335.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{He}^* \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+$	$1,0\cdot 10^{-10}$	[123]
336.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+$	$1,0\cdot 10^{-10}$	[123]
337.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+$	$1,0\cdot 10^{-10}$	[123]

Reakcije negativnih jona sa neutralima u osnovnom stanju (oslobađanje elektrona, transfer naelektrisanja i formiranje klastera)

338.	$\text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{O} + \text{He} + \text{e}^-$	$2,5\cdot 10^{-18}T_0^{0,6}$	[123]
339.	$\text{O}^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{e}^-$	$2,0\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}$	[123]
340.	$\text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{e}^-$	$5,0\cdot 10^{-15}T_0^{0,5}$	[123]
341.	$\text{O}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$3,01\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}$	[123]
342.	$\text{O}^- + \text{N} \rightarrow \text{NO} + \text{e}^-$	$2,6\cdot 10^{-10}$	[123]
343.	$\text{O}^- + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{e}^-$	$2,5\cdot 10^{-10}T_0^{-0,8}$	[123]
344.	$\text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{e}^-$	$1,0\cdot 10^{-14}$	[123]
345.	$\text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2^-$	$1,5\cdot 10^{-12}$	[123]
346.	$\text{O}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O}_3^-$	$1,99\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}$	[123]
347.	$\text{O}^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{NO}_2^-$	$1,0\cdot 10^{-9}$	[123]
348.	$\text{O}^- + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O} + \text{NO}_3^-$	$5,0\cdot 10^{-10}$	[123]
349.	$\text{O}^- + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}^-$	$2,0\cdot 10^{-10}$	[123]
350.	$\text{O}^- + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{e}^-$	$5,0\cdot 10^{-10}$	[123]
351.	$\text{O}^- + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}$	$3,0\cdot 10^{-11}$	[96,175]
352.	$\text{O}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^- + \text{OH}$	$1,4\cdot 10^{-9}$	[96,175]
353.	$\text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{O}_2 + \text{He} + \text{e}^-$	$3,9\cdot 10^{-10}e^{-7400/Tg}$	[123]
354.	$\text{O}_2^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_3 + \text{e}^-$	$1,5\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}$	[123]
355.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$2,7\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}e^{-5590/Tg}$	[123]
356.	$\text{O}_2^- + \text{N} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{e}^-$	$4,0\cdot 10^{-10}$	[123]
357.	$\text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{e}^-$	$1,9\cdot 10^{-12}T_0^{1,5}e^{-4990/Tg}$	[123]
358.	$\text{O}_2^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$	$5,0\cdot 10^{-9}e^{-5000/Tg}$	[123]
359.	$\text{O}_2^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}^-$	$1,5\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}$	[123]
360.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_3^-$	$3,5\cdot 10^{-15}$	[123]
361.	$\text{O}_2^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3^-$	$6,0\cdot 10^{-10}T_0^{0,5}$	[123]
362.	$\text{O}_2^- + \text{N} \rightarrow \text{NO} + \text{O}^-$	$1,0\cdot 10^{-10}$	[123]

363.	$O_2^- + H \rightarrow H^- + O_2$	$7,0 \cdot 10^{-10}$	[179]
364.	$O_2^- + H_2 \rightarrow H^- + HO_2$	$5,0 \cdot 10^{-13}$	[175]
365.	$O_2^- + OH \rightarrow OH^- + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[96,175]
366.	$O_2^- + H_2 \rightarrow OH^- + OH$	$5,0 \cdot 10^{-13}$	[96,175]
367.	$O_2^- + NO_2 \rightarrow O_2 + NO_2^-$	$7,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
368.	$O_2^- + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
369.	$O_2^- + N_2O \rightarrow NO + NO_2^-$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
370.	$O_2^- + N_2O \rightarrow N_2 + O_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
371.	$O_2^- + HNO_3 \rightarrow NO_3^- + HO_2$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	[123]
372.	$O_3^- + He \rightarrow He + O + O_2 + e^-$	$3,9 \cdot 10^{-10} e^{-7400/Tg}$	[96]
373.	$O_3^- + O \rightarrow O_2 + O_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
374.	$O_3^- + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
375.	$O_3^- + N_2O \rightarrow O_2 + O_2 + N_2 + e^-$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
376.	$O_3^- + O \rightarrow O_2 + O_2^-$	$2,5 \cdot 10^{-10} T_0^{0,5}$	[123]
377.	$O_3^- + NO \rightarrow O + NO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
378.	$O_3^- + NO \rightarrow O_2 + NO_2^-$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	[123]
379.	$O_3^- + NO_2 \rightarrow O_2 + NO_3^-$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	[123]
380.	$O_3^- + NO_2 \rightarrow O_3 + NO_2^-$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	[123]
381.	$O_3^- + NO_3 \rightarrow O_3 + NO_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
382.	$O_3^- + N_2O \rightarrow O_2 + N_2 + O_2^-$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
383.	$O_3^- + N_2O \rightarrow NO + NO_3^-$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
384.	$O_3^- + N_2O \rightarrow N_2 + O_4^-$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
385.	$O_3^- + CO_2 \rightarrow O_2 + CO_3^-$	$5,5 \cdot 10^{-10} T_0^{-0,49}$	[123]
386.	$O_4^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2^-$	$2,2 \cdot 10^{-5} T_0^{-1,8} e^{-6300/Tg}$	[123]
387.	$O_4^- + O \rightarrow O_2 + O_2 + O^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
388.	$O_4^- + O \rightarrow O_2 + O_3^-$	$4,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
389.	$O_4^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2^-$	$2,2 \cdot 10^{-5} T_0^{-1,8} e^{-6300/Tg}$	[123]
390.	$O_4^- + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + O_3^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
391.	$O_4^- + NO \rightarrow O_2 + NO_3^-$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
392.	$O_4^- + NO_2 \rightarrow O_2 + O_2 + NO_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
393.	$O_4^- + NO_3 \rightarrow O_2 + O_2 + NO_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
394.	$O_4^- + N_2 \rightarrow O_2 + N_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10} e^{-1044/Tg}$	[123]

395.	$O_4^- + CO_2 \rightarrow O_2 + CO_4^-$	$4,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
396.	$O_4^- + H_2O \rightarrow O_2 + O_2^- \cdot H_2O$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	[123]
397.	$NO^- + O_2 \rightarrow NO + O_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
398.	$NO^- + O_3 \rightarrow NO + O_3^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
399.	$NO^- + NO_2 \rightarrow NO + NO_2^-$	$7,4 \cdot 10^{-10}$	[123]
400.	$NO^- + NO_3 \rightarrow NO + NO_3^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
401.	$NO^- + N_2O \rightarrow N_2 + NO_2^-$	$2,8 \cdot 10^{-14}$	[123]
402.	$NO^- + He \rightarrow He + NO + e^-$	$2,4 \cdot 10^{-13}$	[123]
403.	$NO^- + NO \rightarrow NO + NO + e^-$	$5,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
404.	$NO^- + N_2O \rightarrow NO + N_2O + e^-$	$5,1 \cdot 10^{-12}$	[123]
405.	$NO^- + CO_2 \rightarrow NO + CO_2 + e^-$	$8,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
406.	$NO_2^- + O \rightarrow NO_3 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
407.	$NO_3^- + O \rightarrow O_2 + NO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
408.	$H^- + H_2O \rightarrow OH^- + H_2$	$3,8 \cdot 10^{-9}$	[123]
409.	$H^- + N_2O \rightarrow OH^- + N_2$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	[179]
410.	$H^- + NO_2 \rightarrow NO_2^- + H$	$2,9 \cdot 10^{-9}$	[179]
411.	$NO_2^- + H \rightarrow OH^- + NO$	$1,85 \cdot 10^{-10}$	[96,175]
412.	$NO_2^- + O_3 \rightarrow O_2 + NO_3^-$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	[123]
413.	$NO_2^- + O_3 \rightarrow NO_2 + O_3^-$	$9,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
414.	$NO_2^- + NO \rightarrow NO_2 + NO^-$	$2,75 \cdot 10^{-10}$	[123]
415.	$NO_2^- + NO_2 \rightarrow NO + NO_3^-$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
416.	$NO_2^- + NO_3 \rightarrow NO_2 + NO_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
417.	$NO_2^- + HNO_3 \rightarrow NO_3^- + HNO_2$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	[123]
418.	$NO_2^- + N_2O \rightarrow N_2 + NO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
419.	$NO_3^- + H \rightarrow OH^- + NO_2$	$1,66 \cdot 10^{-11}$	[96,175]
420.	$NO_3^- + O \rightarrow O_2 + NO_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
421.	$NO_3^- + O \rightarrow NO + O_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
422.	$NO_3^- + O \rightarrow NO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
423.	$NO_3^- + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 + NO_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
424.	$NO_3^- + NO \rightarrow NO_2 + NO_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
425.	$NO_3^- + NO_3 \rightarrow O_2 + NO + NO_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
426.	$CO_3^- + O \rightarrow CO_2 + O_2^-$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	[123]

427.	$\text{CO}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_3^-$	$6,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
428.	$\text{CO}_3^- + \text{NO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_2^-$	$1,1 \cdot 10^{-11} T_0^{-1,1}$	[123]
429.	$\text{CO}_3^- + \text{NO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_3^-$	$2,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
430.	$\text{CO}_3^- + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O} + \text{CO}_2 + \text{NO}_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
431.	$\text{CO}_3^- + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{O}_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
432.	$\text{CO}_4^- + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_3^-$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
433.	$\text{CO}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_4^-$	$2,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
434.	$\text{CO}_4^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{O}_3^-$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
435.	$\text{CO}_4^- + \text{NO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_3^-$	$4,8 \cdot 10^{-11}$	[123]
436.	$\text{CO}_4^- + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{NO}_3^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
437.	$\text{CO}_4^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
438.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-$	$5,6 \cdot 10^{-16}$	[123]
439.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
440.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
441.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_3^-$	$2,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
442.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	[123]
443.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-$	$3,1 \cdot 10^{-10}$	[123]
444.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$9,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
445.	$\text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	[123]
446.	$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$5,6 \cdot 10^{-16}$	[123]
447.	$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
448.	$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
449.	$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
450.	$\text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$1,4 \cdot 10^{-14}$	[123]
451.	$\text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$1,4 \cdot 10^{-14}$	[123]
452.	$\text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$1,4 \cdot 10^{-14}$	[123]
453.	$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^-$	$5,6 \cdot 10^{-16}$	[123]
454.	$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^-$	$3,3 \cdot 10^{-14}$	[123]
455.	$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$7,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
456.	$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$7,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
457.	$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
458.	$\text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-14}$	[183]

459.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$5,6 \cdot 10^{-16}$	[123]
460.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
461.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$3,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
462.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
463.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$3,3 \cdot 10^{-14}$	[123]
464.	$\text{O}^- + \text{He} + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_3^-$	$1,1 \cdot 10^{-30} T_0^{-1,0}$	[123]
465.	$\text{O}^- + \text{He} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{He} + \text{CO}_3^-$	$1,5 \cdot 10^{-28}$	[123]
466.	$\text{O}^- + \text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3^-$	$1,1 \cdot 10^{-30} T_0^{-1,0}$	[123]
467.	$\text{O}^- + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-30} T_0^{-1,0}$	[123]
468.	$\text{O}^- + \text{NO} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
469.	$\text{O}^- + \text{NO} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
470.	$\text{O}^- + \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
471.	$\text{O}^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
472.	$\text{O}^- + \text{NO}_2 + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
473.	$\text{O}^- + \text{NO}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
474.	$\text{O}^- + \text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
475.	$\text{O}^- + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
476.	$\text{O}^- + \text{N}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_3^-$	$3,1 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
477.	$\text{O}^- + \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_3^-$	$3,1 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
478.	$\text{O}_2^- + \text{He} + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_4^-$	$3,5 \cdot 10^{-31} T_0^{-1,0}$	[123]
479.	$\text{O}_2^- + \text{NO} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
480.	$\text{O}_2^- + \text{NO} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
481.	$\text{O}_2^- + \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
482.	$\text{O}_2^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-29}$	[123]
483.	$\text{O}_2^- + \text{He} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{He} + \text{CO}_4^-$	$4,7 \cdot 10^{-29}$	[123]
484.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_4^-$	$3,5 \cdot 10^{-31} T_0^{-1,0}$	[123]
485.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_4^-$	$3,5 \cdot 10^{-31} T_0^{-1,0}$	[123]
486.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_4^-$	$2,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
487.	$\text{O}_2^- + \text{N}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_4^-$	$2,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
488.	$\text{O}_2^- + \text{CO}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO}_4^-$	$1,3 \cdot 10^{-29}$	[123]
489.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$3,0 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
490.	$\text{O}_2^- + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$3,0 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]

491.	$\text{NO}_2^- + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,6 \cdot 10^{-28}$	[123]
492.	$\text{NO}_2^- + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,6 \cdot 10^{-28}$	[123]
493.	$\text{NO}_2^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,3 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
494.	$\text{NO}_2^- + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,6 \cdot 10^{-28}$	[123]
495.	$\text{NO}_3^- + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$7,5 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
496.	$\text{NO}_3^- + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$7,5 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
497.	$\text{NO}_3^- + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$7,5 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
498.	$\text{NO}_3^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,3 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
499.	$\text{CO}_3^- + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
500.	$\text{CO}_3^- + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
501.	$\text{CO}_3^- + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
502.	$\text{CO}_3^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-28} T_0^{-1,0}$	[123]
503.	$\text{CO}_4^- + \text{He} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{He} + \text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
504.	$\text{CO}_4^- + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
505.	$\text{CO}_4^- + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]
506.	$\text{CO}_4^- + \text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	$5,0 \cdot 10^{-29} T_0^{-1,0}$	[123]

Reakcije negativnih jona sa neutralima u pobuđenom stanju (oslobađanje elektrona, transfer naelektrisanja i formiranje klastera)

507.	$\text{O}^- + \text{He}^* \rightarrow \text{O} + \text{He} + \text{e}^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
508.	$\text{O}^- + \text{He}_2^* \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O} + \text{e}^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
509.	$\text{O}^- + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{e}^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
510.	$\text{O}^- + \text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{e}^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
511.	$\text{O}^- + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O}_3 + \text{e}^-$	$3,0 \cdot 10^{-10} T_0^{0,5}$	[123]
512.	$\text{O}^- + \text{O}_2(^1\Sigma) \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$6,9 \cdot 10^{-10} T_0^{0,5}$	[123]
513.	$\text{O}^- + \text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{N} + \text{O} + \text{e}^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
514.	$\text{O}^- + \text{N}(^2\text{P}) \rightarrow \text{O} + \text{N} + \text{e}^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
515.	$\text{O}_2^- + \text{He}^* \rightarrow \text{O}_2 + \text{He} + \text{e}^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
516.	$\text{O}_2^- + \text{He}_2^* \rightarrow \text{O}_2 + \text{He} + \text{He} + \text{e}^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
517.	$\text{O}_2^- + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
518.	$\text{O}_2^- + \text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
519.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$2,0 \cdot 10^{-10} T_0^{0,5}$	[123]
520.	$\text{O}_2^- + \text{O}_2(^1\Sigma) \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{e}^-$	$3,6 \cdot 10^{-10} T_0^{0,5}$	[123]

521.	$O_2^- + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
522.	$O_2^- + N(^2P) \rightarrow O_2 + N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
523.	$O_3^- + He^* \rightarrow He + O_3 + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
524.	$O_3^- + He_2^* \rightarrow He + He + O + O_2 + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
525.	$O_3^- + O(^1D) \rightarrow O + O_3 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
526.	$O_3^- + O(^1S) \rightarrow O + O_3 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
527.	$O_3^- + N(^2D) \rightarrow O_3 + N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
528.	$O_3^- + N(^2P) \rightarrow O_3 + N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
529.	$O_4^- + He^* \rightarrow He + O_2 + O_2 + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
530.	$O_4^- + He_2^* \rightarrow He + He + O_2 + O_2 + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
531.	$O_4^- + O(^1D) \rightarrow O + O_2 + O_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
532.	$O_4^- + O(^1S) \rightarrow O + O_2 + O_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
533.	$O_4^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
534.	$O_4^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
535.	$O_4^- + N(^2D) \rightarrow O_2 + O_2 + N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
536.	$O_4^- + N(^2P) \rightarrow O_2 + O_2 + N + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
537.	$CO_3^- + He^* \rightarrow He + O + CO_2 + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
538.	$CO_3^- + O(^1D) \rightarrow O + O + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
539.	$CO_3^- + O(^1S) \rightarrow O + O + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
540.	$CO_3^- + N(^2D) \rightarrow O + N + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
541.	$CO_3^- + N(^2P) \rightarrow O + N + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
542.	$CO_4^- + He^* \rightarrow He + O_2 + CO_2 + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
543.	$CO_4^- + O(^1D) \rightarrow O + O_2 + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
544.	$CO_4^- + O(^1S) \rightarrow O + O_2 + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
545.	$CO_4^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2 + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
546.	$CO_4^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2 + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
547.	$CO_4^- + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
548.	$CO_4^- + N(^2P) \rightarrow O_2 + N + CO_2 + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
549.	$O_2^- \cdot H_2O + He^* \rightarrow He + O_2 + H_2O + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
550.	$O_2^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + O_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
551.	$O_2^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + O_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
552.	$O_2^- \cdot H_2O + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

553.	$O_2^- \cdot H_2O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
554.	$O_2^- \cdot H_2O + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
555.	$O_2^- \cdot H_2O + N(^2P) \rightarrow O_2 + N + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
556.	$CO_3^- \cdot H_2O + He^* \rightarrow He + O + CO_2 + H_2O + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
557.	$CO_3^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + O + CO_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
558.	$CO_3^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + CO_3 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
559.	$CO_3^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + O + CO_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
560.	$CO_3^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + CO_3 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
561.	$CO_3^- \cdot H_2O + N(^2D) \rightarrow O + N + CO_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
562.	$CO_3^- \cdot H_2O + N(^2P) \rightarrow O + N + CO_2 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
563.	$CO_4^- \cdot H_2O + He^* \rightarrow He + O_2 + CO_2 + H_2O + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
564.	$CO_4^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + CO_4 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
565.	$CO_4^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + CO_4 + H_2O + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
566.	$O^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10} T_0^{0,5}$	[123]
567.	$O_2^- + O(^1D) \rightarrow O + O + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
568.	$O_2^- + O(^1S) \rightarrow O + O + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
569.	$O_3^- + O(^1D) \rightarrow O + O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
570.	$O_3^- + O(^1D) \rightarrow O + O_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
571.	$O_3^- + O(^1S) \rightarrow O + O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
572.	$O_3^- + O(^1S) \rightarrow O + O_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
573.	$O_3^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
574.	$O_3^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
575.	$O_3^- + N(^2D) \rightarrow O + N + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
576.	$O_3^- + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
577.	$O_3^- + N(^2P) \rightarrow O + N + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
578.	$O_3^- + N(^2P) \rightarrow O_2 + N + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
579.	$O_4^- + O(^1D) \rightarrow O + O_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
580.	$O_4^- + O(^1D) \rightarrow O_2 + O_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
581.	$O_4^- + O(^1S) \rightarrow O + O_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
582.	$O_4^- + O(^1S) \rightarrow O_2 + O_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
583.	$O_4^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
584.	$O_4^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

585.	$O_4^- + N(^2D) \rightarrow O_2 + N + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
586.	$O_4^- + N(^2P) \rightarrow O_2 + N + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
587.	$CO_3^- + O(^1D) \rightarrow O + CO_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
588.	$CO_3^- + O(^1S) \rightarrow O + CO_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
589.	$CO_3^- + N(^2D) \rightarrow N + CO_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
590.	$CO_3^- + N(^2P) \rightarrow N + CO_2 + O^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
591.	$CO_4^- + O(^1D) \rightarrow O + CO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
592.	$CO_4^- + O(^1S) \rightarrow O + CO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
593.	$CO_4^- + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + CO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
594.	$CO_4^- + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + CO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
595.	$CO_4^- + N(^2D) \rightarrow N + CO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
596.	$CO_4^- + N(^2P) \rightarrow N + CO_2 + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
597.	$O_2^- \cdot H_2O + He_2^* \rightarrow He + He + H_2O + O_2^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
598.	$O_2^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + H_2O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
599.	$O_2^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + H_2O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
600.	$O_2^- \cdot H_2O + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + H_2O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
601.	$O_2^- \cdot H_2O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + H_2O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
602.	$O_2^- \cdot H_2O + N(^2D) \rightarrow N + H_2O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
603.	$O_2^- \cdot H_2O + N(^2P) \rightarrow N + H_2O + O_2^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
604.	$CO_3^- \cdot H_2O + He^* \rightarrow He + H_2O + CO_3^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
605.	$CO_3^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + H_2O + CO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
606.	$CO_3^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + H_2O + CO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
607.	$CO_3^- \cdot H_2O + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + H_2O + CO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
608.	$CO_3^- \cdot H_2O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + H_2O + CO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
609.	$CO_3^- \cdot H_2O + N(^2D) \rightarrow N + H_2O + CO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
610.	$CO_3^- \cdot H_2O + N(^2P) \rightarrow N + H_2O + CO_3^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
611.	$CO_4^- \cdot H_2O + He^* \rightarrow He + H_2O + CO_4^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
612.	$CO_4^- \cdot H_2O + He_2^* \rightarrow He + He + H_2O + CO_4^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
613.	$CO_4^- \cdot H_2O + O(^1D) \rightarrow O + H_2O + CO_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
614.	$CO_4^- \cdot H_2O + O(^1S) \rightarrow O + H_2O + CO_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
615.	$CO_4^- \cdot H_2O + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + H_2O + CO_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
616.	$CO_4^- \cdot H_2O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + H_2O + CO_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

617.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}(^2\text{D}) \rightarrow \text{N} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
618.	$\text{CO}_4^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}(^2\text{P}) \rightarrow \text{N} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
619.	$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He}^* \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
620.	$\text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He}_2^* \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
621.	$\text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He}^* \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
622.	$\text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He}_2^* \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

Jon-jon rekombinacije

623.	$\text{He}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{He} + \text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-1,0}$	[123]
624.	$\text{He}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-1,0}$	[123]
625.	$\text{He}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{He} + \text{O}_3$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-1,0}$	[123]
626.	$\text{He}_2^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
627.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
628.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
629.	$\text{He}_2^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H} + 2\text{He}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,179]
630.	$\text{He}_2^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{OH} + 2\text{He}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
631.	$\text{O}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{O}$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
632.	$\text{O}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{O}(^1\text{D})$	$4,9 \cdot 10^{-10} T_0^{-0,5}$	[123]
633.	$\text{O}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-1,0}$	[123]
634.	$\text{O}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_3$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-1,0}$	[123]
635.	$\text{O}^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
636.	$\text{O}^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{O} + \text{NO}$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
637.	$\text{O}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{O} + \text{NO}_2$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
638.	$\text{O}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{O} + \text{NO}_3$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
639.	$\text{O}_2^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
640.	$\text{O}_2^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
641.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
642.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$4,2 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
643.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
644.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-1,0}$	[123]
645.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
646.	$\text{O}_2^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
647.	$\text{O}_2^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H} + \text{O}_2$	$2,3 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,179]

648.	$O_2^+ + H^- \rightarrow O + O + H$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
649.	$O_2^+ + OH^- \rightarrow OH + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,175]
650.	$O_2^+ + NO^- \rightarrow O + O + NO$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
651.	$O_2^+ + NO^- \rightarrow O_2 + NO$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
652.	$O_2^+ + NO_2^- \rightarrow O + O + NO_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
653.	$O_2^+ + NO_2^- \rightarrow O_2 + NO_2$	$4,1 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
654.	$O_2^+ + NO_3^- \rightarrow O + O + NO_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
655.	$O_2^+ + NO_3^- \rightarrow O_2 + NO_3$	$1,3 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
656.	$O_2^+ + NO_2^- \cdot H_2O \rightarrow O_2 + NO_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
657.	$O_2^+ + NO_3^- \cdot H_2O \rightarrow O_2 + NO_3 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
658.	$O_4^+ + O^- \rightarrow O + O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
659.	$O_4^+ + O^- \rightarrow O_2 + O_3$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
660.	$O_4^+ + O_2^- \rightarrow O + O + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	[123]
661.	$O_4^+ + O_2^- \rightarrow O_2 + O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
662.	$O_4^+ + O_3^- \rightarrow O + O_2 + O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
663.	$O_4^+ + O_3^- \rightarrow O_2 + O_2 + O_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
664.	$O_4^+ + O_4^- \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
665.	$O_4^+ + O_4^- \rightarrow O + O + O_2 + O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
666.	$O_4^+ + H^- \rightarrow 2O_2 + H$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[179]
667.	$O_4^+ + NO^- \rightarrow O_2 + O_2 + NO$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
668.	$O_4^+ + NO_2^- \rightarrow O_2 + O_2 + NO_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
669.	$O_4^+ + NO_3^- \rightarrow O_2 + O_2 + NO_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
670.	$O_4^+ + NO_2^- \cdot H_2O \rightarrow O_2 + O_2 + NO_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
671.	$O_4^+ + NO_3^- \cdot H_2O \rightarrow O_2 + O_2 + NO_3 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
672.	$N^+ + O^- \rightarrow O + N$	$2,6 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
673.	$N^+ + O_2^- \rightarrow O_2 + N$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
674.	$N^+ + O_3^- \rightarrow O_3 + N$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
675.	$N^+ + O_4^- \rightarrow O_2 + O_2 + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
676.	$N^+ + NO^- \rightarrow N + NO$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
677.	$N^+ + NO_2^- \rightarrow N + NO_2$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
678.	$N^+ + NO_3^- \rightarrow N + NO_3$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
679.	$N_2^+ + O^- \rightarrow O + N + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]

680.	$N_2^+ + O^- \rightarrow O + N_2$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
681.	$N_2^+ + O_2^- \rightarrow O_2 + N + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
682.	$N_2^+ + O_2^- \rightarrow O_2 + N_2$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
683.	$N_2^+ + O_3^- \rightarrow O_3 + N + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
684.	$N_2^+ + O_3^- \rightarrow O_3 + N_2$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
685.	$N_2^+ + O_4^- \rightarrow O_2 + O_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
686.	$N_2^+ + O_4^- \rightarrow O_2 + O_2 + N + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
687.	$N_2^+ + H^- \rightarrow N_2 + H$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[179]
688.	$N_2^+ + H^- \rightarrow 2N + H$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[179]
689.	$N_2^+ + NO^- \rightarrow N + N + NO$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
690.	$N_2^+ + NO^- \rightarrow N_2 + NO$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
691.	$N_2^+ + NO_2^- \rightarrow N + N + NO_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
692.	$N_2^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + NO_2$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
693.	$N_2^+ + NO_3^- \rightarrow N + N + NO_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
694.	$N_2^+ + NO_3^- \rightarrow N_2 + NO_3$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
695.	$N_3^+ + O^- \rightarrow N_2 + O + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
696.	$N_3^+ + O_2^- \rightarrow N_2 + O_2 + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
697.	$N_3^+ + O_2^- \rightarrow N_2 + 2O + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
698.	$N_3^+ + NO^- \rightarrow N_2 + N + NO$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
699.	$N_3^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + N + NO_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
700.	$N_3^+ + NO_3^- \rightarrow N_2 + N + NO_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
701.	$N_3^+ + NO_2^- \rightarrow N_2 + O + N + NO$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
702.	$N_3^+ + NO_3^- \rightarrow N_2 + O + N + NO_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
703.	$N_3^+ + O_3^- \rightarrow N_2 + N + O_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
704.	$N_3^+ + O_4^- \rightarrow N_2 + 2O_2 + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
705.	$N_3^+ + H^- \rightarrow N_2 + H + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
706.	$N_3^+ + OH^- \rightarrow N_2 + OH + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
707.	$N_3^+ + OH^- \rightarrow N_2 + O + H + N$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[175]
708.	$N_4^+ + O^- \rightarrow O + N_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
709.	$N_4^+ + O_2^- \rightarrow O_2 + N_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
710.	$N_4^+ + O_3^- \rightarrow O_3 + N_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
711.	$N_4^+ + O_4^- \rightarrow O_2 + O_2 + N_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]

712.	$\text{N}_4^+ + \text{H}^- \rightarrow 2\text{N}_2 + \text{H}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[179]
713.	$\text{N}_4^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
714.	$\text{N}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
715.	$\text{N}_4^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
716.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
717.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
718.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
719.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
720.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O}_3 + \text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
721.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
722.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
723.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
724.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$2,3 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,179]
725.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{H}^- \rightarrow 2\text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,179]
726.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,175]
727.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
728.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{OH} + \text{H}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
729.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{O} + 2\text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
730.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
731.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{NO} + \text{H} + \text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
732.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
733.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
734.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
735.	$\text{H}_2\text{O}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H} + \text{OH}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
736.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
737.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
738.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O}_3 + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
739.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
740.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H} + \text{H}_2 + \text{OH}$	$2,3 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,179]
741.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2,3 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,179]
742.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$4,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,175]
743.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]

744.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{O} + 2\text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
745.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{NO} + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
746.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
747.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
748.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{N}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
749.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{NO}$	$4,9 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
750.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{N}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
751.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}$	$6,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
752.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_3 + \text{N}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
753.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- \rightarrow \text{O}_3 + \text{NO}$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
754.	$\text{NO}^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
755.	$\text{NO}^+ + \text{O}_4^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{N}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
756.	$\text{NO}^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{NO} + \text{H}$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[179]
757.	$\text{NO}^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{N} + \text{O} + \text{H}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[179]
758.	$\text{NO}^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{O} + \text{N} + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
759.	$\text{NO}^+ + \text{NO}^- \rightarrow \text{NO} + \text{NO}$	$2,7 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
760.	$\text{NO}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{O} + \text{N} + \text{NO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
761.	$\text{NO}^+ + \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
762.	$\text{NO}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{O} + \text{N} + \text{NO}_3$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
763.	$\text{NO}^+ + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_3$	$9,0 \cdot 10^{-8} T_0^{-0,5}$	[123]
764.	$\text{NO}^+ + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
765.	$\text{NO}^+ + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
766.	$\text{NO}_2^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[179]
767.	$\text{NO}_2^+ + \text{H}^- \rightarrow \text{NO} + \text{O} + \text{H}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[123]
768.	$\text{NO}_2^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{OH} + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[96,175]
769.	$\text{NO}_2^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{NO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
770.	$\text{NO}_2^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{OH} + \text{NO} + \text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
771.	$\text{NO}_2^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{O} + \text{H} + \text{NO} + \text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	[96,175]
772.	$\text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
773.	$\text{O}_2^+ \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
774.	$\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{OH} + \text{NO}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]
775.	$\text{H}_3\text{O}^+ \cdot \text{OH} + \text{NO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-7} T_0^{-0,5}$	[123]

776.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{NO}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-7}T_0^{-0,5}$	[123]
777.	$\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-\cdot\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-7}T_0^{-0,5}$	[123]
778.	$\text{He}^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
779.	$\text{He}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
780.	$\text{He}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
781.	$\text{He}^+ + \text{O}_4^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
782.	$\text{He}^+ + \text{O}_4^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
783.	$\text{He}^+ + \text{O}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
784.	$\text{He}_2^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{He} + \text{O}$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
785.	$\text{He}_2^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O} + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
786.	$\text{He}_2^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O} + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
787.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{He} + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
788.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
789.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
790.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_3^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{He} + \text{O}_3$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
791.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_3^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_3 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
792.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_3$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
793.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_4^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
794.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_4^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + 2\text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
795.	$\text{He}_2^+ + \text{O}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
796.	$\text{O}^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
797.	$\text{O}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
798.	$\text{O}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
799.	$\text{O}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
800.	$\text{O}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
801.	$\text{O}^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
802.	$\text{O}^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
803.	$\text{O}^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
804.	$\text{O}^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
805.	$\text{O}^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{N}_2$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
806.	$\text{O}^+ + \text{O}_3^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}_3$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
807.	$\text{O}^+ + \text{O}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_3$	$2,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]

808.	$O^+ + O_4^- + He \rightarrow He + O + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
809.	$O^+ + O_4^- + O_2 \rightarrow O + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
810.	$O_2^+ + O^- + He \rightarrow He + O + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
811.	$O_2^+ + O^- + He \rightarrow He + O_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
812.	$O_2^+ + O^- + O_2 \rightarrow O + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
813.	$O_2^+ + O^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
814.	$O_2^+ + O^- + N_2 \rightarrow O_2 + O + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
815.	$O_2^+ + O^- + N_2 \rightarrow O_3 + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
816.	$O_2^+ + O_2^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
817.	$O_2^+ + O_2^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
818.	$O_2^+ + O_2^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
819.	$O_2^+ + O_3^- + He \rightarrow He + O_2 + O_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
820.	$O_2^+ + O_3^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
821.	$O_2^+ + O_3^- + N_2 \rightarrow O + O_2 + O_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
822.	$O_2^+ + O_4^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
823.	$O_2^+ + O_4^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
824.	$O_2^+ + O_4^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
825.	$O_2^+ + H^- + He \rightarrow H + O_2 + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
826.	$O_2^+ + H^- + N_2 \rightarrow H + O_2 + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
827.	$O_2^+ + H^- + O_2 \rightarrow H + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
828.	$O_2^+ + H^- + H_2O \rightarrow H + O_2 + H_2O$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
829.	$O_2^+ + H^- + He \rightarrow HO_2 + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
830.	$O_2^+ + H^- + N_2 \rightarrow HO_2 + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
831.	$O_2^+ + H^- + O_2 \rightarrow HO_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
832.	$O_2^+ + H^- + H_2O \rightarrow HO_2 + H_2O$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
833.	$O_2^+ + O_2^- \cdot H_2O + He \rightarrow He + O_2 + O_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
834.	$O_2^+ + O_2^- \cdot H_2O + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + N_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
835.	$O_2^+ + O_2^- \cdot H_2O + O_2 \rightarrow 3O_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
836.	$O_2^+ + CO_3^- + He \rightarrow He + O + O_2 + CO_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
837.	$O_2^+ + CO_3^- + N_2 \rightarrow O + O_2 + N_2 + CO_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
838.	$O_2^+ + CO_3^- + O_2 \rightarrow O + 2O_2 + CO_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
839.	$O_2^+ + CO_4^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2 + CO_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]

840.	$O_2^+ + CO_4^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + N_2 + CO_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
841.	$O_2^+ + CO_4^- + O_2 \rightarrow 3O_2 + CO_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
842.	$O_4^+ + O^- + He \rightarrow He + O + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
843.	$O_4^+ + O^- + O_2 \rightarrow O + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
844.	$O_4^+ + O^- + N_2 \rightarrow O + O_2 + O_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
845.	$O_4^+ + O_2^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
846.	$O_4^+ + O_2^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
847.	$O_4^+ + O_2^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
848.	$O_4^+ + O_3^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2 + O_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
849.	$O_4^+ + O_3^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
850.	$O_4^+ + O_3^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_3 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
851.	$O_4^+ + O_4^- + He \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_2 + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
852.	$O_4^+ + O_4^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_2 + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
853.	$O_4^+ + O_4^- + N_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + O_2 + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
854.	$O_4^+ + H^- + He \rightarrow 2O_2 + H + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
855.	$O_4^+ + H^- + N_2 \rightarrow 2O_2 + H + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
856.	$O_4^+ + H^- + O_2 \rightarrow 2O_2 + H + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
857.	$O_4^+ + H^- + H_2O \rightarrow 2O_2 + H + H_2O$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
858.	$H_2O^+ + OH^- + He \rightarrow H_2O + OH + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
859.	$H_2O^+ + OH^- + N_2 \rightarrow H_2O + OH + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
860.	$H_2O^+ + OH^- + O_2 \rightarrow H_2O + OH + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
861.	$H_2O^+ + OH^- + H_2O \rightarrow H_2O + OH + H_2O$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
862.	$H_2O^+ + H^- + He \rightarrow H_2O + H + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
863.	$H_2O^+ + H^- + N_2 \rightarrow H_2O + H + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
864.	$H_2O^+ + H^- + O_2 \rightarrow H_2O + H + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
865.	$H_2O^+ + H^- + H_2O \rightarrow H_2O + H + H_2O$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[96,175]
866.	$H_3O^+ + H^- + He \rightarrow H_2 + H_2O + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
867.	$H_3O^+ + H^- + N_2 \rightarrow H_2 + H_2O + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
868.	$H_3O^+ + H^- + O_2 \rightarrow H_2 + H_2O + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
869.	$H_3O^+ + H^- + H_2O \rightarrow H_2 + H_2O + H_2O$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
870.	$H_3O^+ + H^- + He \rightarrow H + H_2 + OH + He$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
871.	$H_3O^+ + H^- + N_2 \rightarrow H + H_2 + OH + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]

872.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}_2 + \text{OH} + \text{O}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
873.	$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2 + \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
874.	$\text{N}^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{N}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
875.	$\text{N}^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
876.	$\text{N}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{N}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
877.	$\text{N}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
878.	$\text{N}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{N}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
879.	$\text{N}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
880.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
881.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{N}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
882.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
883.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{N}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
884.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
885.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{N}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
886.	$\text{N}^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
887.	$\text{N}_2^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
888.	$\text{N}_2^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{N}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
889.	$\text{N}_2^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
890.	$\text{N}_2^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
891.	$\text{N}_2^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
892.	$\text{N}_2^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
893.	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
894.	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
895.	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
896.	$\text{N}_2^+ + \text{H}^- + \text{He} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H} + \text{He}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
897.	$\text{N}_2^+ + \text{H}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H} + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
898.	$\text{N}_2^+ + \text{H}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H} + \text{O}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
899.	$\text{N}_2^+ + \text{H}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
900.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
901.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
902.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
903.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]

904.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
905.	$\text{NO}^+ + \text{O}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
906.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
907.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
908.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
909.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
910.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
911.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_3$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
912.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_3 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
913.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
914.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
915.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
916.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
917.	$\text{NO}^+ + \text{O}_3^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{N}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
918.	$\text{NO}^+ + \text{O}_4^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
919.	$\text{NO}^+ + \text{O}_4^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
920.	$\text{NO}^+ + \text{O}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{O}_2 + \text{NO}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
921.	$\text{NO}^+ + \text{H}^- + \text{He} \rightarrow \text{H} + \text{NO} + \text{He}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[175]
922.	$\text{NO}^+ + \text{H}^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{H} + \text{NO} + \text{N}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
923.	$\text{NO}^+ + \text{H}^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{H} + \text{NO} + \text{O}_2$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
924.	$\text{NO}^+ + \text{H}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$2,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[179]
925.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_3^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{NO} + \text{CO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
926.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_3^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{NO} + \text{CO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
927.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{NO} + \text{CO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
928.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_4^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{NO} + \text{CO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
929.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_4^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO} + \text{CO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
930.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO} + \text{CO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
931.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2 + \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
932.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
933.	$\text{NO}^+ + \text{O}_2^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
934.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{NO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
935.	$\text{NO}^+ + \text{CO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{NO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]

968.	$O_2^+ \cdot H_2O + CO_4^- + He \rightarrow He + 2O_2 + CO_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
969.	$O_2^+ \cdot H_2O + CO_4^- + N_2 \rightarrow 2O_2 + N_2 + CO_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
970.	$O_2^+ \cdot H_2O + CO_4^- + O_2 \rightarrow 3O_2 + CO_2 + H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
971.	$O_2^+ \cdot H_2O + O_2^- \cdot H_2O + He \rightarrow He + 2O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
972.	$O_2^+ \cdot H_2O + O_2^- \cdot H_2O + N_2 \rightarrow 2O_2 + N_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
973.	$O_2^+ \cdot H_2O + O_2^- \cdot H_2O + O_2 \rightarrow 3O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
974.	$H_3O^+ \cdot OH + O^- + He \rightarrow He + O + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
975.	$H_3O^+ \cdot OH + O^- + N_2 \rightarrow N_2 + O + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
976.	$H_3O^+ \cdot OH + O^- + O_2 \rightarrow O_2 + O + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
977.	$H_3O^+ \cdot OH + O_2^- + He \rightarrow He + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
978.	$H_3O^+ \cdot OH + O_2^- + N_2 \rightarrow N_2 + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
979.	$H_3O^+ \cdot OH + O_2^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
980.	$H_3O^+ \cdot OH + O_3^- + He \rightarrow He + O + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
981.	$H_3O^+ \cdot OH + O_3^- + N_2 \rightarrow N_2 + O + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
982.	$H_3O^+ \cdot OH + O_3^- + O_2 \rightarrow O_2 + O + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
983.	$H_3O^+ \cdot OH + O_4^- + He \rightarrow He + O_2 + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
984.	$H_3O^+ \cdot OH + O_4^- + N_2 \rightarrow N_2 + O_2 + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
985.	$H_3O^+ \cdot OH + O_4^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + O_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
986.	$H_3O^+ \cdot OH + CO_3^- + He \rightarrow He + O + CO_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
987.	$H_3O^+ \cdot OH + CO_3^- + N_2 \rightarrow N_2 + O + CO_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
988.	$H_3O^+ \cdot OH + CO_3^- + O_2 \rightarrow O_2 + O + CO_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
989.	$H_3O^+ \cdot OH + CO_4^- + He \rightarrow He + O_2 + CO_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
990.	$H_3O^+ \cdot OH + CO_4^- + N_2 \rightarrow N_2 + O_2 + CO_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
991.	$H_3O^+ \cdot OH + CO_4^- + O_2 \rightarrow O_2 + O_2 + CO_2 + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
992.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O^- + He \rightarrow He + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
993.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O^- + N_2 \rightarrow N_2 + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
994.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O^- + O_2 \rightarrow O_2 + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
995.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O_2^- + He \rightarrow He + O + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
996.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O_2^- + N_2 \rightarrow O + N_2 + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
997.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O_2^- + O_2 \rightarrow O + O_2 + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
998.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O_3^- + He \rightarrow He + O_2 + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]
999.	$H_3O^+ \cdot H_2O + O_3^- + N_2 \rightarrow O_2 + N_2 + OH + 2H_2O$	$1,0 \cdot 10^{-25} T_0^{-2,5}$	[123]

1000. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1001. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_4^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O}_3 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1002. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_4^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_3 + \text{N}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1003. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_3 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1004. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{CO}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1005. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1006. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1007. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{CO}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1008. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1009. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1010. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1011. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1012. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1013. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{CO}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1014. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1015. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1016. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{He} \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{CO}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1017. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]
1018. $\text{H}_3\text{O}^+\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_4^-\cdot\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{OH} + 3\text{H}_2\text{O}$	$1,0\cdot 10^{-25}T_0^{-2,5}$	[123]

Procesi između neutrala u osnovnom stanju

1019. $\text{He} + \text{O}_3 \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}_2$	$1,56\cdot 10^{-9}e^{-11400/Tg}$	[123]
1020. $\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{O}_2$	$9,26\cdot 10^{-34}T_0^{-1,0}$	[123]
1021. $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}_2$	$9,4\cdot 10^{-11}e^{-11400/Tg}$	[123]
1022. $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$8,0\cdot 10^{-12}e^{-2060/Tg}$	[123]
1023. $\text{O} + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2(^1\text{D})$	$6,49\cdot 10^{-13}$	[123]
1024. $\text{O} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$	$8,3\cdot 10^{-11}e^{-500/Tg}$	[123]
1025. $\text{O} + \text{HNO} \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$	$5,99\cdot 10^{-11}$	[123]
1026. $\text{O} + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	$2,0\cdot 10^{-11}e^{-3000/Tg}$	[123]
1027. $\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{OH}$	$3,0\cdot 10^{-14}T_g e^{-4480/Tg}$	[123]
1028. $\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{HO}_2$	$3,3\cdot 10^{-11}e^{-2950/Tg}$	[123]
1029. $\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}$	$8,93\cdot 10^{-13}T_0 e^{-19494,5/Tg}$	[123]
1030. $\text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$	$3,0\cdot 10^{-11}$	[123]

1031. $O + NO_2 \rightarrow NO_3$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	[123]
1032. $O + NO_2 \rightarrow O_2 + NO$	$6,5 \cdot 10^{-12} e^{120/T_g}$	[123]
1033. $O + NO_3 \rightarrow O + O + NO_2$	$3,1 \cdot 10^{-4} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1034. $O + NO_3 \rightarrow O + O_2 + NO$	$7,44 \cdot 10^{-4} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1035. $O + NO_3 \rightarrow O_2 + NO_2$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1036. $O + N_2 \rightarrow N + NO$	$1,06 \cdot 10^{-6} T_g^{-1,0} e^{-38400/T_g}$	[123]
1037. $O + H \rightarrow OH$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1038. $O + OH \rightarrow O_2 + H$	$2,2 \cdot 10^{-11} \exp^{120/T_g}$	[123]
1039. $O + H_2O \rightarrow OH + OH$	$2,5 \cdot 10^{-14} T_g^{1,14} e^{-8624/T_g}$	[123]
1040. $O_2 + O_2 \rightarrow O + O + O_2$	$6,6 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,5} e^{-59000/T_g}$	[123]
1041. $O_2 + O_3 \rightarrow O + O_2 + O_2$	$1,6 \cdot 10^{-9} e^{-11400/T_g}$	[123]
1042. $O_2 + HNO \rightarrow NO + HO_2$	$5,25 \cdot 10^{-12} e^{-1510/T_g}$	[123]
1043. $O_2 + HNO \rightarrow NO_2 + OH$	$1,66 \cdot 10^{-15}$	[123]
1044. $O_2 + H_2O \rightarrow OH + HO_2$	$7,72 \cdot 10^{-12} e^{-37284/T_g}$	[123]
1045. $O_2 + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + HO_2$	$9,0 \cdot 10^{-11} e^{-19965/T_g}$	[123]
1046. $O_2 + N \rightarrow O + NO$	$8,9 \cdot 10^{-17}$	[123]
1047. $O_2 + NO_2 \rightarrow O + O_2 + NO$	$5,3 \cdot 10^{-6} T_0^{-2,0} e^{-36180/T_g}$	[123]
1048. $O_2 + NO_3 \rightarrow O + O_2 + NO_2$	$3,1 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1049. $O_2 + NO_3 \rightarrow O_2 + O_2 + NO$	$6,2 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1050. $O_2 + H \rightarrow O + OH$	$3,7 \cdot 10^{-10} e^{-8455/T_g}$	[123]
1051. $O_3 + O_3 \rightarrow O + O_2 + O_3$	$1,6 \cdot 10^{-9} e^{-11400/T_g}$	[123]
1052. $O_3 + H \rightarrow O + HO_2$	$7,51 \cdot 10^{-13}$	[123]
1053. $O_3 + HO_2 \rightarrow O_2 + O_2 + OH$	$1,4 \cdot 10^{-14} e^{-600/T_g}$	[123]
1054. $O_3 + OH \rightarrow O_2 + HO_2$	$1,6 \cdot 10^{-12} e^{-1000/T_g}$	[123]
1055. $O_3 + N \rightarrow O_2 + NO$	$2,0 \cdot 10^{-16}$	[123]
1056. $O_3 + NO \rightarrow O_2 + NO_2$	$2,0 \cdot 10^{-12} e^{-1400/T_g}$	[123]
1057. $O_3 + NO_2 \rightarrow O_2 + NO_3$	$1,2 \cdot 10^{-13} e^{-2450/T_g}$	[123]
1058. $O_3 + N_2 \rightarrow O + O_2 + N_2$	$1,6 \cdot 10^{-9} e^{-11400/T_g}$	[123]
1059. $O_3 + H \rightarrow O_2 + OH$	$7,78 \cdot 10^{-11} T_0^{0,26} e^{-327,8/T_g}$	[123]
1060. $O_3 + H_2O \rightarrow O + O_2 + H_2O$	$1,6 \cdot 10^{-9} e^{-11400/T_g}$	[123]
1061. $N + O_2 \rightarrow O + NO$	$1,5 \cdot 10^{-11} e^{-3600/T_g}$	[123]
1062. $N + O_3 \rightarrow O_2 + NO$	$2,0 \cdot 10^{-16}$	[123]

1063. $\text{N} + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$	$2,1 \cdot 10^{-11} e^{100/T_g}$	[123]
1064. $\text{N} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{N}_2$	$9,1 \cdot 10^{-13}$	[123]
1065. $\text{N} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2\text{O}$	$5,8 \cdot 10^{-12} e^{220/T_g}$	[123]
1066. $\text{N} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
1067. $\text{N} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}$	$2,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
1068. $\text{N} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O} + \text{N} + \text{NO}_2$	$3,1 \cdot 10^{-4} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1069. $\text{N} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N} + \text{NO}$	$7,44 \cdot 10^{-4} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1070. $\text{N} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2$	$3,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1071. $\text{N} + \text{OH} \rightarrow \text{NO} + \text{H}$	$3,92 \cdot 10^{-11} e^{72,3/T_g}$	[123]
1072. $\text{N} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$	$1,7 \cdot 10^{-11} e^{-1000/T_g}$	[123]
1073. $\text{NO} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{NO} + \text{NO}$	$5,3 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-36180/T_g}$	[123]
1074. $\text{NO} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O} + \text{NO} + \text{NO}_2$	$3,1 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1075. $\text{NO} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO} + \text{N}$	$6,2 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1076. $\text{NO} + \text{NO}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_2$	$1,5 \cdot 10^{-11} e^{170/T_g}$	[123]
1077. $\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{HNO}$	$3,3 \cdot 10^{-12} e^{-1000/T_g}$	[123]
1078. $\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	$3,4 \cdot 10^{-12} e^{270/T_g}$	[123]
1079. $\text{NO}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{NO} + \text{NO}_2$	$4,0 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-36180/T_g}$	[123]
1080. $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO} + \text{NO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-13} e^{-1600/T_g}$	[123]
1081. $\text{NO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$	$4,0 \cdot 10^{-10} e^{-340/T_g}$	[123]
1082. $\text{NO}_3 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2 + \text{NO}_2$	$8,5 \cdot 10^{-13} e^{-2450/T_g}$	[123]
1083. $\text{NO}_3 + \text{H} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$	$5,8 \cdot 10^{-10} e^{-750/T_g}$	[123]
1084. $\text{NO}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{HO}_2$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1085. $\text{NO}_3 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}_2 + \text{OH}$	$4,8 \cdot 10^{-12}$	[123]
1086. $\text{NO}_3 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{HNO}_3$	$9,2 \cdot 10^{-13}$	[123]
1087. $\text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N} + \text{N} + \text{N}_2$	$3,5 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,6} e^{-113000/T_g}$	[123]
1088. $\text{N}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{NO}$	$6,8 \cdot 10^{-6} T_0^{-2,0} e^{-36180/T_g}$	[123]
1089. $\text{N}_2 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2 + \text{NO}_2$	$3,1 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1090. $\text{N}_2 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{NO}$	$6,2 \cdot 10^{-5} T_0^{-2,0} e^{-25000/T_g}$	[123]
1091. $\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$6,87 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,0}$	[123]
1092. $\text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}$	$8,0 \cdot 10^{-21} T_g^{-2,8} e^{-1950/T_g}$	[123]
1093. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$9,18 \cdot 10^{-11} e^{-971,9/T_g}$	[123]
1094. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}({}^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O}$	$4,8 \cdot 10^{-16} T_g^{1,55} e^{-80,58/T_g}$	[123]

1095. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}({}^1\text{S}) + \text{H}_2\text{O}$	$4,8 \cdot 10^{-16} T_g^{1,55} e^{-80,58/T_g}$	[123]
1096. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2$	$1,1 \cdot 10^{-12} T_g^{0,56} e^{-346/T_g}$	[123]
1097. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2({}^1\Delta) + \text{H}_2$	$2,7 \cdot 10^{-16} T_g^{1,63} e^{-2000/T_g}$	[123]
1098. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2({}^1\Sigma) + \text{H}_2$	$2,7 \cdot 10^{-16} T_g^{1,63} e^{-2000/T_g}$	[123]
1099. $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	$2,35 \cdot 10^{-10} e^{-373,7/T_g}$	[123]
1100. $\text{H} + \text{HNO} \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2$	$3,0 \cdot 10^{-11} e^{-500/T_g}$	[123]
1101. $\text{H} + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2$	$2,0 \cdot 10^{-11} e^{-3700/T_g}$	[123]
1102. $\text{H} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,39 \cdot 10^{-14} T_0^{3,29} e^{-3160/T_g}$	[123]
1103. $\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$1,69 \cdot 10^{-11} e^{-1800/T_g}$	[123]
1104. $\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2$	$2,8 \cdot 10^{-12} e^{-1900/T_g}$	[123]
1105. $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$4,2 \cdot 10^{-12} e^{-240/T_g}$	[123]
1106. $\text{OH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,8 \cdot 10^{-11} e^{250/T_g}$	[123]
1107. $\text{OH} + \text{HNO} \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	$8,0 \cdot 10^{-11} e^{-500/T_g}$	[123]
1108. $\text{OH} + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,8 \cdot 10^{-11} e^{-390/T_g}$	[123]
1109. $\text{OH} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$1,5 \cdot 10^{-14} e^{650/T_g}$	[123]
1110. $\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$3,2 \cdot 10^{-11} e^{-2600/T_g}$	[123]
1111. $\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$2,9 \cdot 10^{-12} e^{-160/T_g}$	[123]
1112. $\text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	$2,0 \cdot 10^{-5} T_g^{-1,18} e^{-24415/T_g}$	[123]
1113. $\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	$2,2 \cdot 10^{-13} e^{-600/T_g}$	[123]
1114. $\text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$	$4,65 \cdot 10^{-11} e^{-16477/T_g}$	[123]
1115. $\text{HNO} + \text{HNO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$1,4 \cdot 10^{-15} e^{-1600/T_g}$	[123]
1116. $\text{HNO}_2 + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-20}$	[123]
1117. $\text{HNO}_2 + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,6 \cdot 10^{-17}$	[123]
1118. $\text{H}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O}_2$	$5,0 \cdot 10^{-11} e^{-13110/T_g}$	[123]
1119. $\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH} + \text{H}_2$	$5,8 \cdot 10^{-9} e^{-52900/T_g}$	[123]
1120. $\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	$2,0 \cdot 10^{-9} T_g^{-4,86} e^{-26821/T_g}$	[123]
1121. $\text{He} + \text{O} + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-33}$	[123]
1122. $\text{He} + \text{O} + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{O}_2({}^1\Delta)$	$9,88 \cdot 10^{-35}$	[123]
1123. $\text{He} + \text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{O}_3$	$3,4 \cdot 10^{-34} T_0^{-1,2}$	[123]
1124. $\text{He} + \text{O} + \text{NO} \rightarrow \text{He} + \text{NO}_2$	$1,0 \cdot 10^{-31}$	[123]
1125. $\text{He} + \text{O} + \text{NO}_2 \rightarrow \text{He} + \text{NO}_3$	$9,0 \cdot 10^{-32} T_0^{-2,0}$	[123]
1126. $\text{He} + \text{O} + \text{H} \rightarrow \text{He} + \text{OH}$	$3,2 \cdot 10^{-33} T_0^{-1,0}$	[123]

1127. He + N + N → He + N ₂	$7,6 \cdot 10^{-34} e^{500/T_g}$	[123]
1128. He + H + OH → He + H ₂ O	$1,56 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,6}$	[123]
1129. O + O + O → O + O ₂	$9,21 \cdot 10^{-34} T_0^{-0,63}$	[123]
1130. O + O + O → O + O ₂ (¹ Δ)	$6,93 \cdot 10^{-35} T_0^{-0,63}$	[123]
1131. O + O + O ₂ → O + O ₃	$3,4 \cdot 10^{-34} T_0^{-1,2}$	[123]
1132. O + O + O ₂ → O ₂ + O ₂	$2,56 \cdot 10^{-34} T_0^{-0,63}$	[123]
1133. O + O + O ₂ → O ₂ + O ₂ (¹ Δ)	$1,93 \cdot 10^{-35} T_0^{-0,63}$	[123]
1134. O + O + O ₃ → O ₂ + O ₃	$4,6 \cdot 10^{-34} \exp^{1050/T_g}$	[123]
1135. O + O + N → O ₂ + N	$3,2 \cdot 10^{-33} T_0^{-0,41}$	[123]
1136. O + O + N ₂ → O ₂ + N ₂	$6,49 \cdot 10^{-35} e^{1039/T_g}$	[123]
1137. O + O + H ₂ O → O ₂ + H ₂ O	$1,7 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1138. O + O + H ₂ → O ₂ + H ₂	$2,65 \cdot 10^{-33} T_0^{-1,0}$	[123]
1139. O + O ₂ + O ₂ → O ₂ + O ₃	$6,0 \cdot 10^{-34} T_0^{-2,8}$	[123]
1140. O + O ₂ + O ₃ → O ₃ + O ₃	$2,3 \cdot 10^{-35} e^{-1057/T_g}$	[123]
1141. O + O ₂ + N → O ₂ + NO	$1,76 \cdot 10^{-31} T_g^{-0,5}$	[123]
1142. O + O ₂ + H → O ₂ + OH	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1143. O + N ₂ + H → N ₂ + OH	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1144. O + H ₂ O + H → H ₂ O + OH	$2,76 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1145. O + He + H → He + OH	$1,62 \cdot 10^{-32}$	[123]
1146. O + H ₂ + H → H ₂ + OH	$9,19 \cdot 10^{-33} T_0^{-1,0}$	[123]
1147. O + O ₂ + NO → O ₂ + NO ₂	$6,34 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1148. O + O ₂ + NO ₂ → O ₂ + NO ₃	$8,08 \cdot 10^{-33} (1000/T_g)^{2,0}$	[123]
1149. O + O ₂ + N ₂ → O ₃ + N ₂	$1,1 \cdot 10^{-34} e^{510/T_g}$	[123]
1150. O + N + He → NO + He	$1,76 \cdot 10^{-31} T_g^{-0,5}$	[123]
1151. O + N + N ₂ → N ₂ + NO	$1,76 \cdot 10^{-31} T_g^{-0,5}$	[123]
1152. O + N + O ₂ → NO + O ₂	$1,76 \cdot 10^{-31} T_g^{-0,5}$	[123]
1153. O + N + CO ₂ → NO + CO ₂	$1,76 \cdot 10^{-31} T_g^{-0,5}$	[123]
1154. O + N + H ₂ O → NO + H ₂ O	$1,76 \cdot 10^{-31} T_g^{-0,5}$	[123]
1155. O + NO + NO → NO + NO ₂	$6,34 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1156. O + NO + NO ₂ → NO ₂ + NO ₂	$6,34 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1157. O + NO + N ₂ O → NO ₂ + N ₂ O	$6,34 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1158. O + N ₂ + NO → N ₂ + NO ₂	$9,0 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,5}$	[123]

1159. $\text{O} + \text{N}_2 + \text{NO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{NO}_3$	$9,0 \cdot 10^{-32} T_0^{-2,0}$	[123]
1160. $\text{O}_2 + \text{N} + \text{N} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	$3,9 \cdot 10^{-33}$	[123]
1161. $\text{O}_2 + \text{NO} + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{NO}_2$	$3,3 \cdot 10^{-39} e^{530/T_g}$	[123]
1162. $\text{O}_2 + \text{H} + \text{He} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{He}$	$5,4 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1163. $\text{O}_2 + \text{H} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{N}_2$	$5,4 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1164. $\text{O}_2 + \text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{O}_2$	$5,4 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1165. $\text{O}_2 + \text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$5,4 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,8}$	[123]
1166. $\text{O}_2 + \text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2$	$5,72 \cdot 10^{-32} T_0^{-0,86}$	[123]
1167. $\text{O}_2 + \text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$6,88 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,0}$	[123]
1168. $\text{N} + \text{N} + \text{N} \rightarrow \text{N} + \text{N}_2$	$3,31 \cdot 10^{-27} T_0^{-1,5}$	[123]
1169. $\text{N} + \text{N} + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2$	$7,6 \cdot 10^{-34} e^{500/T_g}$	[123]
1170. $\text{N} + \text{N} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{CO}_2$	$3,9 \cdot 10^{-33}$	[123]
1171. $\text{N} + \text{N} + \text{He} \rightarrow \text{N}_2 + \text{He}$	$7,6 \cdot 10^{-34} e^{500/T_g}$	[123]
1172. $\text{N} + \text{N} + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$	$7,6 \cdot 10^{-34} e^{500/T_g}$	[123]
1173. $\text{N} + \text{N} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$7,6 \cdot 10^{-34} e^{500/T_g}$	[123]
1174. $\text{N}_2 + \text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$6,88 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,0}$	[123]
1175. $\text{CO}_2 + \text{H} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,1 \cdot 10^{-23} T_g^{-2,6}$	[123]
1176. $\text{H} + \text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$2,46 \cdot 10^{-30} T_0^{-2,0}$	[123]
1177. $\text{NO} + \text{H} + \text{He} \rightarrow \text{HNO} + \text{He}$	$1,0 \cdot 10^{-32} e^{300/T_g}$	[123]
1178. $\text{NO} + \text{H} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HNO} + \text{N}_2$	$1,0 \cdot 10^{-32} e^{300/T_g}$	[123]
1179. $\text{NO} + \text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HNO} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-32} e^{300/T_g}$	[123]
1180. $\text{NO} + \text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-32} e^{300/T_g}$	[123]
1181. $\text{NO} + \text{OH} + \text{He} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{He}$	$7,4 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,4}$	[123]
1182. $\text{NO} + \text{OH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{N}_2$	$7,4 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,4}$	[123]
1183. $\text{NO} + \text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{O}_2$	$7,4 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,4}$	[123]
1184. $\text{NO} + \text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$7,4 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,4}$	[123]
1185. $\text{NO}_2 + \text{OH} + \text{He} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{He}$	$2,2 \cdot 10^{-30} T_0^{-2,9}$	[123]
1186. $\text{NO}_2 + \text{OH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{N}_2$	$2,2 \cdot 10^{-30} T_0^{-2,9}$	[123]
1187. $\text{NO}_2 + \text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{O}_2$	$2,2 \cdot 10^{-30} T_0^{-2,9}$	[123]
1188. $\text{NO}_2 + \text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$2,2 \cdot 10^{-30} T_0^{-2,9}$	[123]
1189. $\text{H} + \text{H} + \text{He} \rightarrow \text{H}_2 + \text{He}$	$1,8 \cdot 10^{-30} T_g^{-1,0}$	[123]
1190. $\text{H} + \text{H} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{N}_2$	$1,8 \cdot 10^{-30} T_g^{-1,0}$	[123]

1191. $\text{H} + \text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	$1,8 \cdot 10^{-30} T_g^{-1,0}$	[123]
1192. $\text{H} + \text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$1,8 \cdot 10^{-30} T_g^{-1,0}$	[123]
1193. $\text{H} + \text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2$	$6,0 \cdot 10^{-31} T_0^{-1,0}$	[123]
1194. $\text{H} + \text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2$	$8,1 \cdot 10^{-33} T_0^{-0,6}$	[123]
1195. $\text{H} + \text{OH} + \text{He} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{He}$	$6,1 \cdot 10^{-26} T_g^{-2,0}$	[123]
1196. $\text{H} + \text{OH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$	$6,1 \cdot 10^{-26} T_g^{-2,0}$	[123]
1197. $\text{H} + \text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$6,1 \cdot 10^{-26} T_g^{-2,0}$	[123]
1198. $\text{H} + \text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$6,1 \cdot 10^{-26} T_g^{-2,0}$	[123]
1199. $\text{H} + \text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4,92 \cdot 10^{-31} T_0^{-2,0}$	[123]
1200. $\text{OH} + \text{OH} + \text{He} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{He}$	$6,9 \cdot 10^{-31} T_0^{-0,8}$	[123]
1201. $\text{OH} + \text{OH} + \text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{N}_2$	$6,9 \cdot 10^{-31} T_0^{-0,8}$	[123]
1202. $\text{OH} + \text{OH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$6,9 \cdot 10^{-31} T_0^{-0,8}$	[123]
1203. $\text{OH} + \text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$6,9 \cdot 10^{-31} T_0^{-0,8}$	[123]

Procesi između neutrala u pobuđenom stanju

1204. $\text{He} + \text{N}_2(v=1) \rightarrow \text{He} + \text{N}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1205. $\text{He} + \text{N}_2(v=2) \rightarrow \text{He} + \text{N}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1206. $\text{He} + \text{N}_2(v=3) \rightarrow \text{He} + \text{N}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1207. $\text{He} + \text{N}_2(v=4) \rightarrow \text{He} + \text{N}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1208. $\text{He} + \text{O}_2(v=1) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1209. $\text{He} + \text{O}_2(v=2) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1210. $\text{He} + \text{O}_2(v=3) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1211. $\text{He} + \text{O}_2(v=4) \rightarrow \text{He} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1212. $\text{He} + \text{H}_2\text{O}(100-001) \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123,179]*
1213. $\text{He} + \text{H}_2\text{O}(010) \rightarrow \text{He} + \text{H}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123,179]*
1214. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=1) \rightarrow \text{N} + \text{N} + \text{N}_2$	$3,5 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,6} e^{-109648/T_g}$	[123]
1215. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=2) \rightarrow \text{N} + \text{N} + \text{N}_2$	$3,5 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,6} e^{-106297/T_g}$	[123]
1216. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=3) \rightarrow \text{N} + \text{N} + \text{N}_2$	$3,5 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,6} e^{-102946/T_g}$	[123]
1217. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=4) \rightarrow \text{N} + \text{N} + \text{N}_2$	$3,5 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,6} e^{-99595/T_g}$	[123]
1218. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=1) \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2$	$3,5 \cdot 10^{-21}$	[123]
1219. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=2) \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2(v=1)$	$1,5 \cdot 10^{-20}$	[123]
1220. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=3) \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2(v=2)$	$1,5 \cdot 10^{-20}$	[123]
1221. $\text{N}_2 + \text{N}_2(v=4) \rightarrow \text{N}_2 + \text{N}_2(v=3)$	$2,5 \cdot 10^{-20}$	[123]

1222. $N_2(v = 1) + N_2(v = 1) \rightarrow N_2 + N_2(v = 2)$	$3,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
1223. $N_2(v = 1) + N_2(v = 2) \rightarrow N_2 + N_2(v = 3)$	$4,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
1224. $N_2(v = 1) + N_2(v = 3) \rightarrow N_2 + N_2(v = 4)$	$5,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
1225. $O + O_2(v=1) \rightarrow O + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1226. $O + O_2(v=2) \rightarrow O + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1227. $O + O_2(v=3) \rightarrow O + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1228. $O + O_2(v=4) \rightarrow O + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1229. $O_2 + O_2(v = 1) \rightarrow O + O + O_2$	$6,6 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,5} e^{-56760/Tg}$	[123]
1230. $O_2 + O_2(v = 2) \rightarrow O + O + O_2$	$6,6 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,5} e^{-54520/Tg}$	[123]
1231. $O_2 + O_2(v = 3) \rightarrow O + O + O_2$	$6,6 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,5} e^{-52281/Tg}$	[123]
1232. $O_2 + O_2(v = 4) \rightarrow O + O + O_2$	$6,6 \cdot 10^{-9} T_0^{-1,5} e^{-50041/Tg}$	[123]
1233. $O_2 + O_2(v = 1) \rightarrow O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1234. $O_2 + O_2(v = 2) \rightarrow O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1235. $O_2 + O_2(v = 3) \rightarrow O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1236. $O_2 + O_2(v = 4) \rightarrow O_2 + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1237. $He + He_2^* \rightarrow He + He + He$	$4,9 \cdot 10^{-16}$	[123]
1238. $He + O(^1D) \rightarrow He + O$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
1239. $He + O(^1S) \rightarrow He + O$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
1240. $He + O_2(^1\Delta) \rightarrow He + O_2$	$8,0 \cdot 10^{-21} T_0^{0,5}$	[123]
1241. $He + O_2(^1\Sigma) \rightarrow He + O_2(^1\Delta)$	$1,0 \cdot 10^{-17} T_0^{0,5}$	[123]
1242. $O + O(^1D) \rightarrow O + O$	$8,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1243. $O + O(^1S) \rightarrow O + O$	$3,33 \cdot 10^{-11} e^{-300/Tg}$	[123]
1244. $O + O(^1S) \rightarrow O + O(^1D)$	$1,67 \cdot 10^{-11} e^{-300/Tg}$	[123]
1245. $O + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O_2$	$2,0 \cdot 10^{-16}$	[123]
1246. $O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O + O_2$	$8,0 \cdot 10^{-15} T_0^{0,5}$	[123]
1247. $O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O + O_2(^1\Delta)$	$7,2 \cdot 10^{-14} T_0^{0,5}$	[123]
1248. $O + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O(^1D) + O_2$	$5,97 \cdot 10^{-14}$	[123]
1249. $O + N(^2D) \rightarrow O(^1D) + N$	$4,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
1250. $O + N(^2D) \rightarrow O + N$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
1251. $O + N(^2P) \rightarrow O + N$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	[123]
1252. $O + N(^2D) \rightarrow NO^+ + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1253. $O + N(^2P) \rightarrow NO^+ + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]

1254. $N + N(^2P) \rightarrow N + N(^2D)$	$1,8 \cdot 10^{-12}$	[123]
1255. $O_2 + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O_3$	$2,94 \cdot 10^{-21} T_0^{0,5}$	[123]
1256. $O_2 + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2$	$3,0 \cdot 10^{-18} e^{-200/T_g}$	[123]
1257. $O_2 + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2$	$4,0 \cdot 10^{-18} T_0^{0,5}$	[123]
1258. $O_2 + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2(^1\Delta)$	$3,6 \cdot 10^{-17} T_0^{0,5}$	[123]
1259. $O_2 + N(^2D) \rightarrow O + NO$	$1,5 \cdot 10^{-12} T_0^{0,5}$	[123]
1260. $O_2 + N(^2D) \rightarrow O(^1D) + NO$	$6,0 \cdot 10^{-12} T_0^{0,5}$	[123]
1261. $O_2 + N(^2P) \rightarrow O + NO$	$2,6 \cdot 10^{-12}$	[123]
1262. $O_2 + N(^2P) \rightarrow O(^1D) + NO$	$2,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1263. $O_2 + N(^2P) \rightarrow O(^1S) + NO$	$2,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1264. $O_3 + N(^2D) \rightarrow O + O_2 + N$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1265. $O_3 + N(^2D) \rightarrow O_2 + NO$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1266. $O_3 + N(^2P) \rightarrow O + O_2 + N$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1267. $He^* + He^* \rightarrow He + He^+ + e^-$	$4,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
1268. $He^* + He^* \rightarrow He_2^+ + e^-$	$1,05 \cdot 10^{-9}$	[123]
1269. $He^* + He_2^* \rightarrow He + He + He^+ + e^-$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1270. $He^* + He_2^* \rightarrow He + He_2^+ + e^-$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	[123]
1271. $He^* + O \rightarrow He + O^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1272. $He^* + O(^1D) \rightarrow He + O^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1273. $He^* + O(^1S) \rightarrow He + O^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1274. $He^* + O_2 \rightarrow He + O_2^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1275. $He^* + O_2(^1\Delta) \rightarrow He + O_2^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1276. $He^* + O_2(^1\Sigma) \rightarrow He + O_2^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1277. $He^* + O_3 \rightarrow He + O + O_2^+ + e^-$	$2,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1278. $He^* + N_2 \rightarrow He + N + N^+ + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1279. $He^* + N_2 \rightarrow He + N_2^+ + e^-$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1280. $He^* + H_2O \rightarrow He + H_2O^+ + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1281. $He_2^* + He_2^* \rightarrow He + He + He + He^+ + e^-$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1282. $He_2^* + He_2^* \rightarrow He + He + He_2^+ + e^-$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	[123]
1283. $He_2^* + He \rightarrow He + He + He$	$1,5 \cdot 10^{-15}$	[123]
1284. $He_2^* + O_2 \rightarrow He + He + O_2$	$1,5 \cdot 10^{-15}$	[123]
1285. $He_2^* + N_2 \rightarrow He + He + N_2$	$1,5 \cdot 10^{-15}$	[123]

1286. $\text{He}_2^* + \text{O} \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}^+ + \text{e}^-$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1287. $\text{He}_2^* + \text{O}(^1\text{D}) \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}^+ + \text{e}^-$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1288. $\text{He}_2^* + \text{O}(^1\text{S}) \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}^+ + \text{e}^-$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1289. $\text{He}_2^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2^+ + \text{e}^-$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1290. $\text{He}_2^* + \text{O}_3 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O} + \text{O}_2^+ + \text{e}^-$	$3,6 \cdot 10^{-10}$	[123]
1291. $\text{He}_2^* + \text{N}_2 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{N}_2^+ + \text{e}^-$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1292. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$4,8 \cdot 10^{-12} e^{-67/Tg}$	[123]
1293. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2(^1\text{D})$	$1,6 \cdot 10^{-12} e^{-67/Tg}$	[123]
1294. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2(^1\text{S})$	$2,56 \cdot 10^{-11} e^{-67/Tg}$	[123]
1295. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{O}_2$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	[123]
1296. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_3 \rightarrow \text{O} + \text{O}_3$	$2,41 \cdot 10^{-10}$	[123]
1297. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	[123]
1298. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{O} + \text{NO}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
1299. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{NO} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	[123]
1300. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{NO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{NO}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1301. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{O} + \text{N}_2$	$1,8 \cdot 10^{-11} e^{107/Tg}$	[123]
1302. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{O} + \text{O} + \text{N}_2$	$7,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1303. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{O} + \text{N}_2\text{O}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1304. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{N}_2$	$4,4 \cdot 10^{-11}$	[123]
1305. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{NO} + \text{NO}$	$7,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1306. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O} + \text{CO}_2$	$7,4 \cdot 10^{-11} e^{120/Tg}$	[123]
1307. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H} \rightarrow \text{OH}$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1308. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{OH} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}$	$6,0 \cdot 10^{-11} T_0^{-0,186} e^{-154/Tg}$	[123]
1309. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{HO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$	$8,3 \cdot 10^{-11} e^{-500/Tg}$	[123]
1310. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{OH}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	[123]
1311. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{HO}_2$	$5,2 \cdot 10^{-10}$	[123]
1312. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	[123]
1313. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	$1,62 \cdot 10^{-10} e^{-64,95/Tg}$	[123]
1314. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	[123]
1315. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1316. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$1,6 \cdot 10^{-12} e^{-850/Tg}$	[123]
1317. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2$	$3,2 \cdot 10^{-12} e^{-850/Tg}$	[123]

1318.	$O(^1S) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O + O$	$3,2 \cdot 10^{-11}$	[123]
1319.	$O(^1S) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O_2$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	[123]
1320.	$O(^1S) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O + O_2(^1\Sigma)$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	[123]
1321.	$O(^1S) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O(^1D) + O_2$	$3,6 \cdot 10^{-11}$	[123]
1322.	$O(^1S) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O(^1D) + O_2(^1\Sigma)$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	[123]
1323.	$O(^1S) + O_3 \rightarrow O + O + O_2$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1324.	$O(^1S) + O_3 \rightarrow O + O(^1D) + O_2$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	[123]
1325.	$O(^1S) + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$	$5,8 \cdot 10^{-10}$	[123]
1326.	$O(^1S) + NO \rightarrow O + NO$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	[123]
1327.	$O(^1S) + NO \rightarrow O(^1D) + NO$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1328.	$O(^1S) + NO_2 \rightarrow O + O + NO$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1329.	$O(^1S) + N_2 \rightarrow O + N_2$	$5,0 \cdot 10^{-17}$	[123]
1330.	$O(^1S) + N_2O \rightarrow O + O + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1331.	$O(^1S) + N_2O \rightarrow O + N_2O$	$9,3 \cdot 10^{-12}$	[123]
1332.	$O(^1S) + N_2O \rightarrow O(^1D) + N_2O$	$3,1 \cdot 10^{-12}$	[123]
1333.	$O(^1S) + CO_2 \rightarrow O + CO_2$	$3,09 \cdot 10^{-13}$	[123]
1334.	$O(^1S) + H \rightarrow OH$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1335.	$O(^1S) + OH \rightarrow O_2 + H$	$6,0 \cdot 10^{-11} T_0^{-0,186} e^{-154/Tg}$	[123]
1336.	$O(^1S) + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$	$8,3 \cdot 10^{-11} e^{-500/Tg}$	[123]
1337.	$O(^1S) + H_2 \rightarrow H + OH$	$2,6 \cdot 10^{-16}$	[123]
1338.	$O(^1S) + H_2O_2 \rightarrow OH + HO_2$	$5,2 \cdot 10^{-10}$	[123]
1339.	$O(^1S) + H_2O \rightarrow O_2 + H_2$	$2,2 \cdot 10^{-12}$	[123]
1340.	$O(^1S) + H_2O \rightarrow O + H_2O$	$3,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1341.	$O(^1S) + H_2O \rightarrow O(^1D) + H_2O$	$1,5 \cdot 10^{-10}$	[123]
1342.	$O(^1S) + H_2O \rightarrow OH + OH$	$5,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1343.	$N(^2D) + N(^2P) \rightarrow N_2^+ + e^-$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1344.	$N(^2D) + NO \rightarrow O + N_2$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	[123]
1345.	$N(^2D) + NO \rightarrow O(^1D) + N_2$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	[123]
1346.	$N(^2D) + NO \rightarrow O(^1S) + N_2$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	[123]
1347.	$N(^2D) + NO \rightarrow N_2O$	$6,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1348.	$N(^2D) + N_2 \rightarrow N + N_2$	$6,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
1349.	$N(^2D) + N_2O \rightarrow O + N + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]

1350. $N(^2D) + N_2O \rightarrow N_2 + NO$	$3,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1351. $N(^2P) + NO \rightarrow O + N_2$	$3,0 \cdot 10^{-11}$	[123]
1352. $N(^2P) + NO_2 \rightarrow O + N + NO$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1353. $N(^2P) + N_2 \rightarrow N + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-18}$	[123]
1354. $N(^2P) + N_2 \rightarrow N(^2D) + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-18}$	[123]
1355. $N(^2P) + N_2O \rightarrow O + N + N_2$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	[123]
1356. $O_2(^1\Delta) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2$	$9,0 \cdot 10^{-17} e^{-560/Tg}$	[123]
1357. $O_2(^1\Delta) + O_2(^1\Delta) \rightarrow O_2 + O_2(^1\Sigma)$	$9,0 \cdot 10^{-17} e^{-560/Tg}$	[123]
1358. $O_2(^1\Delta) + O_3 \rightarrow O + O_2 + O_2$	$5,2 \cdot 10^{-11} e^{-2840/Tg}$	[123]
1359. $O_2(^1\Delta) + N \rightarrow O + NO$	$2,0 \cdot 10^{-14} e^{-600/Tg}$	[123]
1360. $O_2(^1\Delta) + NO \rightarrow O + NO_2$	$4,88 \cdot 10^{-18}$	[123]
1361. $O_2(^1\Delta) + NO \rightarrow O_2 + NO$	$2,5 \cdot 10^{-11}$	[123]
1362. $O_2(^1\Delta) + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$	$3,0 \cdot 10^{-21}$	[123]
1363. $O_2(^1\Delta) + H \rightarrow O + OH$	$1,83 \cdot 10^{-13} e^{-1550/Tg}$	[123]
1364. $O_2(^1\Delta) + H_2 \rightarrow O_2 + H_2$	$1,5 \cdot 10^{-18}$	[123]
1365. $O_2(^1\Delta) + H_2O \rightarrow O_2 + H_2O$	$1,5 \cdot 10^{-17}$	[123]
1366. $O_2(^1\Sigma) + O_2(^1\Sigma) \rightarrow O_2 + O_2(^1\Delta)$	$3,6 \cdot 10^{-17} T_0^{0,5}$	[123]
1367. $O_2(^1\Sigma) + O_3 \rightarrow O + O_2 + O_2$	$7,33 \cdot 10^{-12} T_0^{0,5}$	[123]
1368. $O_2(^1\Sigma) + O_3 \rightarrow O + O_2(^1\Delta) + O_2(^1\Delta)$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	[123]
1369. $O_2(^1\Sigma) + O_3 \rightarrow O_2 + O_3$	$7,33 \cdot 10^{-12} T_0^{0,5}$	[123]
1370. $O_2(^1\Sigma) + O_3 \rightarrow O_2(^1\Delta) + O_3$	$7,33 \cdot 10^{-12} T_0^{0,5}$	[123]
1371. $O_2(^1\Sigma) + NO \rightarrow O_2(^1\Delta) + NO$	$4,0 \cdot 10^{-14}$	[123]
1372. $O_2(^1\Sigma) + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$	$2,0 \cdot 10^{-15}$	[123]
1373. $O_2(^1\Sigma) + N_2 \rightarrow O_2(^1\Delta) + N_2$	$2,1 \cdot 10^{-15}$	[123]
1374. $O_2(^1\Sigma) + H_2O \rightarrow O_2 + H_2O$	$4,0 \cdot 10^{-12}$	[123]
1375. $O_2(^1\Sigma) + H_2O \rightarrow O_2(^1\Delta) + H_2O$	$4,6 \cdot 10^{-12}$	[123]
1376. $O_2(^1\Sigma) + H_2 \rightarrow O_2 + H_2$	$1,5 \cdot 10^{-18}$	[123]
1377. $O_2(^1\Sigma) + CO_2 \rightarrow O_2(^1\Delta) + CO_2$	$4,1 \cdot 10^{-13}$	[123]
1378. $He + He + He^* \rightarrow He + He_2^*$	$1,5 \cdot 10^{-34}$	[123]
1379. $He + He^* + O \rightarrow He + He + O^+ + e^-$	$1,6 \cdot 10^{-31}$	[123]
1380. $He + He^* + O(^1D) \rightarrow He + He + O^+ + e^-$	$1,6 \cdot 10^{-31}$	[123]
1381. $He + He^* + O_2 \rightarrow He + He + O_2^+ + e^-$	$1,6 \cdot 10^{-31}$	[123]

1382. $\text{He} + \text{He}^* + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2^+ + \text{e}^-$	$1,6 \cdot 10^{-31}$	[123]
1383. $\text{He} + \text{He}^* + \text{O}_2(^1\Sigma) \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O}_2^+ + \text{e}^-$	$1,6 \cdot 10^{-31}$	[123]
1384. $\text{He} + \text{He}^* + \text{O}_3 \rightarrow \text{He} + \text{He} + \text{O} + \text{O}_2^+ + \text{e}^-$	$1,6 \cdot 10^{-31}$	[123]
1385. $\text{He} + \text{O} + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{He} + \text{O} + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-32}$	[123]
1386. $\text{O} + \text{O} + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2(^1\Delta)$	$7,4 \cdot 10^{-33}$	[123]
1387. $\text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O} + \text{O}_2 + \text{O}_2$	$1,0 \cdot 10^{-32}$	[123]
1388. $\text{O} + \text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$9,94 \cdot 10^{-33}$	[123]
1389. $\text{O} + \text{O}(^1\text{S}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$9,94 \cdot 10^{-33}$	[123]
1390. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{He}$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1391. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{N}_2$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1392. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{O}_2$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1393. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1394. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H} + \text{He} \rightarrow \text{OH} + \text{He}$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1395. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H} + \text{N}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{N}_2$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1396. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1397. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1398. $\text{O}(^1\text{D}) + \text{O}(^1\text{D}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$	$5,0 \cdot 10^{-33}$	[123]
1399. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{N}_2 + \text{He} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{He}$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1400. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{N}_2$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1401. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{O}_2$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1402. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$9,0 \cdot 10^{-37}$	[123]
1403. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{H} + \text{He} \rightarrow \text{OH} + \text{He}$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1404. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{H} + \text{N}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{N}_2$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1405. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1406. $\text{O}(^1\text{S}) + \text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$4,36 \cdot 10^{-32} T_0^{-1,0}$	[123]
1407. $\text{O}_2 + \text{O}_2(^1\Delta) + \text{O}_2(^1\Delta) \rightarrow \text{O}_3 + \text{O}_3$	$1,0 \cdot 10^{-31}$	[123]
1408. $\text{O}_2 + \text{O}_2(^1\Sigma) + \text{O}_2(^1\Sigma) \rightarrow \text{O}_3 + \text{O}_3$	$1,0 \cdot 10^{-31}$	[123]

LITERATURA

- [1] Adamovich, I., Baalrud, S. D., Bogaerts, A., Bruggeman, P. J., Cappelli, M., Colombo, V., Czarnetzki, U., Ebert, U., Eden, J. G., Favia, P., Graves, D. B., Hamaguchi, S., Hieftje, G., Hori, M., Kaganovich, I. D., Kortshagen, U., Kushner, M. J., Mason, N. J., Mazouffre, S., Mededovic Thagard, S., Metelmann, H-R., Mizuno, A., Moreau, E., Murphy, A. B., Niemira, B. A., Oehrlein, G. S., Petrovic, Z. Lj., Pitchford, L. C., Pu, Y-K., Rauf, S., Sakai, O., Samukawa, S., Starikovskaia, S., Tennyson, J., Terashima, K., Turner, M. M., van de Sanden, M. C. M., Vardelle, A. (2017) “The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 323001.
- [2] Adams, N. G., Bohme, D. K., Dunkin, D. B., Fehsenfeld, F. C., Ferguson, E. E. (1970) “Flowing Afterglow Studies of Formation and Reactions of Cluster Ions of O_2^+ , O_2^- , and O^- ”, *The Journal of Chemical Physics* **52**, 3133.
- [3] Albritton, D. L. (1978) “Ion-neutral reaction-rate constants measured in flow reactors through 1977”, *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* **22**, No. 1.
- [4] Aldea, E., Peeters, P., De Vries, H., Van De Sanden, M. C. M. (2005) “Atmospheric glow stabilization. Do we need pre-ionization?”, *Surface & Coatings Technology* **200**, 46-50.
- [5] Alves, L. L. (2007) “Fluid modelling of the positive column of direct-current glow discharges”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **16**, 557–569.
- [6] Alves, L. L., Bartschat, K., Biagi, S. F., Bordage, M. C., Pitchford, L. C., Ferreira, C. M., Hagelaar, G. J. M., Morgan, W. L., Pancheshnyi, S., Phelps, A. V., Puech, V., Zatsarinny, O. (2013) “Comparisons of sets of electron-neutral scattering cross sections and swarm parameters in noble gases: II. Helium and neon”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 334002.
- [7] Alves, L. L., Bogaerts, A., Guerra, V., Turner, M. M. (2018) “Foundations of modelling of nonequilibrium low-temperature plasmas”, *Plasma Sources, Sci. Technol.* **27**, 023002.
- [8] Arslanbekov, R. R., Kolobov, V. I. (2003) “Two-dimensional simulations of the transition from Townsend to glow discharge and subnormal oscillations”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, 2986–2994.

- [9] Ashida, S., Lee, C., Lieberman, M. A. (1995) “Spatially averaged (global) model of time modulated high density argon plasmas”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **13**, 2498.
- [10] Babaeva, N. Y., Naidis, G. V., Panov, V. A., Wang, R., Zhang, S., Zhang, C., Shao, T. (2019) “Plasma bullet propagation and reflection from metallic and dielectric targets”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 095006.
- [11] Balescu, R. (1997) “STATISTICAL DYNAMICS: Matter Out of Equilibrium”, Imperial Collage Press, London.
- [12] Balooch, M., Moalem, M., Wang, W-E., Hamza, A. V., (1996) “Low-energy Ar ion-induced and chlorine ion etching of silicon”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **14**, 229.
- [13] Becker, K. H., Kogelschatz, U., Schoenbach, K. H., Barker, R. J. (2005) “Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure” (Series in Plasma Physics, Institute of Physics Publishing Bristol and London).
- [14] Behrisch, R., Ed. (1981) “Sputtering by Particle Bombardment I.”, *Topics in Appl. Phys.* **47**, Berlin: Springer Verlag.
- [15] Bhoj, A. N., Kushner, M. J. (2006) “Multi-scale simulation of functionalization of rough polymer surfaces using atmospheric pressure plasmas”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 1594–1598.
- [16] Boeuf, J. P. (1987) “A two-dimensional model of dc glow discharges”, *J. Appl. Phys.* **63** (5) 1342-1349.
- [17] Boeuf, J. P., Marode, E. (1982a) “A Monte Carlo analysis of an electron swarm in a nonuniform field: the cathode region of a glow discharge in helium”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **15**, 2169-2187.
- [18] Boeuf, J. P., Marode, E. (1982b) “Monte Carlo simulation of electron swarm motion in SF₆”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **17**, 1133-1148.
- [19] Boeuf, J. P., Pitchford, L. C. (1994) “Two-dimensional model of a capacitively coupled rf discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor”, *Phys. Rev. E* **51**, No. 2, 1376-1390.
- [20] Bogaerts, A. (2009) “Hybrid Monte Carlo — Fluid model for studying the effects of nitrogen addition to argon glow discharges”, *Spectrochimica Acta Part B* **64**, 126–140.

- [21] Bogaerts, A., Gijbels, R. (1997a) “Comparison of argon and neon as discharge gases in a direct-current glow discharge A mathematical simulation”, *Spectrochimica Acta Part B* **52**, 553-565.
- [22] Bogaerts, A., Gijbels, R. (1997b) “Comprehensive description of a Grimm-type glow discharge source used for optical emission spectrometry: a mathematical simulation”, *Spectrochimica Acta Part B* **53**, 437-462.
- [23] Bogaerts, A., Gijbels, R., Goedheer, W. J. (1995) “Hybrid Monte Carlo-fluid model of a direct current glow discharge”, *J. Appl. Phys.* **78** (4), 2233-2241.
- [24] Bogaerts, A., Okhrimovskyy, A., Gijbels, R. (2002) “Calculation of the gas flow and its effect on the plasma characteristics for a modified Grimm-type glow discharge cell”, *J. Anal. At. Spectrom.* **17**, 1076–1082.
- [25] Bogdanov, E. A., Adams, S. F., Demidov, W. I., Kudryavtsev, A. A., Williamson, J. M. (2010) “Influence of the transverse dimension on the structure and properties of dc glow discharges”, *PHYSICS OF PLASMAS* **17**, 103502.
- [26] Bogolyubov, N. N. (1946) “Problemy Dinamicheskoi Teorii v Statisticheskoi Fizike” (Technical Press, Moscow, 1946).
- [27] Bortner, M. H., Baurer, T. (1979) “Defense Nuclear Agency Reaction Rate Handbook”, Second Edition, Section 24, Revision No 7, NTIS AD-763699.
- [28] Bošnjaković, D., Petrović, Z. Lj., Dujko, S. (2016) “Fluid modeling of resistive plate chambers: impact of transport data on development of streamers and induced signals”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 405201.
- [29] Branchett, S. E., Tennyson, J., Morgan, L. A. (1991) “Differential cross sections for electronic excitation of molecular hydrogen using the R-matrix method”, *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* **24**, 3479-3490.
- [30] Bruggeman P., Cunge G., Sadeghi N. (2012) “Absolute OH density measurements by broadband UV absorption in diffuse atmospheric pressure He-H₂O glow discharges”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 035019.
- [31] Bruggeman, P. J., Iza, F., Brandenburg, R. (2017) “Foundations of atmospheric pressure nonequilibrium plasmas”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 123002.
- [32] Bruggeman, P. J., Kushner, M. J., Locke, B. R., Gardeniers, J. G. E., Graham, W. G., Graves, D. B., Hofman-Caris, R. C. H. M., Maric, D., Reid, J. P., Ceriani, E., Fernandez Rivas, D., Foster, J. E., Garrick, S. C., Gorbanev, Y., Hamaguchi, S.,

- Iza, F., Jablonowski, H., Klimova, E., Kolb, J., Krcma, F., Lukes, P., Machala, Z., Marinov, I., Mariotti, D., Mededovic Thagard, S., Minakata, D., Neyts, E. C., Pawlat, J., Petrovic, Z. Lj., Pflieger, R., Reuter, S., Schram, D. C., Schroter, S., Shiraiwa, M., Tarabova, B., Tsai, P. A., Verlet, J. R. R., von Woedtke, T., Wilson, K. R., Yasui, K., Zvereva, G. (2016), „Plasma–liquid interactions: a review and roadmap“, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 053002.
- [33] Bruggeman, P., Graham, L., Degroote, J., Vierendeels, J., Leys, C. (2007) “Water surface deformation in strong electrical fields and its influence on electrical breakdown in a metal pin–water electrode system”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 4779-4786.
- [34] Bruggeman, P., Schram, D. C. (2010) “On OH production in water containing atmospheric pressure plasmas”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 045025.
- [35] Capitelli, M., Celiberto, R., Colonna, G., Esposito, F., Gorse, C., Hassouni, K., Laricchiuta, A., Longo, S. (2016) “Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics Kinetics”, *Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics* (Springer, New York).
- [36] Capitelli, M., Ferreira, C. M., Gordiets, B. F., Osipov, A. I. (2000) “Plasma Kinetics in Atmospheric Gases”, *Atomic, Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics* (Springer, New York).
- [37] Chabert, P., Lichtenberg, A. J., Lieberman, M. A., Marakhtanov, A. M. (2001) “Instabilities in low-pressure electronegative inductive discharges”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **10**, 478–489.
- [38] Chabert, P., Monreal, A. J., Bredin, J., Popelier, L., Aanesland, A. (2012) “Global model of a gridded-ion thruster powered by a radiofrequency inductive coil”, *Phys. Plasmas* **19**, 073512.
- [39] Chen, F. F. (1984) “Introduction to plasma physics and controlled fusion”, 2ed. (New York and London).
- [40] Colonna, G., Capitelli, M. (2001) “The influence of atomic and molecular metastable states in high-enthalpy nozzle expansion nitrogen flows”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34**, 1812.
- [41] de Uguijo, J., Basurto, E., Juarez, A. M., Ness, K. F., Robson, R. E., Brunger, M. J., White, R. D. (2014) “Electron drift velocities in He and water mixtures:

- Measurements and assessment of the water vapour cross-section sets”, *J. Chem. Phys.* **141**, 014308.
- [42] Deng, X., Shi, J., Kong, M. G. (2006) “Physical Mechanisms of Inactivation of *Bacillus subtilis* Spores Using Cold Atmospheric Plasmas”, *IEEE Transactions on Plasma Science* **34**, 1310 - 1316.
- [43] Donnelly, V. M., Flamm, D. L., Ibbotson, D. E. (1983) “Plasma etching of III-V compound semiconductors”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **1**, 626.
- [44] Donnelly, V. M., Kornblit, A. (2013) “Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **31**, 050825.
- [45] Dorai, R., Hassouni, K., Kushner, M. J. (2000) “Interaction between soot particles and NO_x during dielectric barrier discharge plasma remediation of simulated diesel exhaust”, *J. Appl. Phys.* **88**, No 10.
- [46] Dorai, R., Kushner, M. J. (2003) “A model for plasma modification of polypropylene using atmospheric pressure discharges”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, 666–685.
- [47] Dudek, D. N., Bibinov, N., Engemann, J., Awakowicz, P. (2007) “Direct current plasma jet needle source”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 7367–7371.
- [48] Dujko, S., Ebert, U., White, R. D., Petrović, Z. Lj. (2011a) “Boltzmann Equation Analysis of Electron Transport in a N₂–O₂ Streamer Discharge”, *Japanese Journal of Applied Physics* **50**, 08JC01.
- [49] Dujko, S., Markosyan, A., White, R. D., Ebert, U. (2013) “High-order fluid model for streamer discharges: I. Derivation of model and transport data”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 475202.
- [50] Dujko, S., White, R. D., Petrović, Z. Lj. (2008) “Monte Carlo studies of non-conservative electron transport in the steady-state Townsend experiment”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 245205.
- [51] Dujko, S., White, R. D., Petrović, Z. Lj., Robson, R. E. (2011b) “A multi-term solution of the nonconservative Boltzmann equation for the analysis of temporal and spatial non-local effects in charged-particle swarms in electric and magnetic fields”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **20**, 024013.
- [52] Esashi, M., Ono, T. (2005) “From MEMS to nanomachine”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, R223–R230.

- [53] Fahrner, W. R. (2005) “Nanotechnology and Nanoelectronics Materials, Devices, Measurement Techniques”, Springer Berlin Heidelberg New York.
- [54] Faure, A., Gorfinkiel, J. D., Tennyson, J. (2004) “Electron-impact rotational excitation of water”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **347**, 323-333.
- [55] Fridman, A. (2008a) “Plasma Chemistry” (Cambridge University Press, New York).
- [56] Fridman, A. A. (2013) “From short pulses to short breaks: exotic plasma bullets via residual electron control”, *Scientific Reports*, 3(1599), pp. 1–6.
- [57] Fridman, A. A., Friedman, G., Weltmann, K-D., Kramer, A. (2011) “PLASMA MEDICINE”, Volume **1**, Issue 1, Begell House, Inc.
- [58] Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N., Fridman, A. (2008b) “Applied Plasma Medicine”, *Plasma Process. Polym.* **5**, 503–533.
- [59] Fridman, G., Shereshevsky, A., Jost, M. M., Brooks, A. D., Fridman, A., Gutsol, A., Vasilets, V., Friedman, G. (2007) “Floating Electrode Dielectric Barrier Discharge Plasma in Air Promoting Apoptotic Behavior in Melanoma Skin Cancer Cell Lines”, *Plasma Chem Plasma Process* **27**:163–176.
- [60] Gherardi, M., Puač, N., Marić, D., Stancampiano, A., Malović, G., Colombo, V. and Petrović, Z. L. (2015) “Practical and theoretical considerations on the use of ICCD imaging for the characterization of non-equilibrium plasmas”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 064004.
- [61] Gocić, S., Mladenović, Ž. (2018) „Global model simulation of OH production in pulsed-DC atmospheric pressure helium-air plasma jets“, *Open Phys.* **16**:375–382.
- [62] Godyak, V. A., Piejak, R. B. (1990) “Abnormally Low Electron Energy and Heating-Mode Transition in a Low-Pressure Argon rf Discharge at 13.56 MHz”, *Phys. Rev. Letters* **65**, 8.
- [63] Gorbanev, Y., Maldonado, A-P., Bogaerts, A. (2018) “Analysis of Short-Lived Reactive Species in Plasma–Air–Water Systems: The Dos and the Do Nots”, *Anal. Chem.* **90**, 13151–13158.
- [64] Graves, D. B. (2012) “The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 263001.

- [65] Gregus, J. A., Vernon, M. F., Gottscho, R. A., Scheller, G. R., Hobson, W. S., Opila, R. L., Yoon, E. (1993) “Low-Temperature Plasma Etching of GaAs, AlGaAs, and AlAs”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **13**, 3.
- [66] Guaitella, O., Sobota, A. (2015) “The impingement of a kHz helium atmospheric pressure plasma jet on a dielectric surface”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 255202.
- [67] Gudmundsson, J. T., Thorsteinsson, E. G. (2007) “Oxygen discharges diluted with argon: dissociation processes”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **16**, 399–412.
- [68] Guerra, V., Sa, P. A., Loureiro, J. (2004) “Kinetic modeling of low-pressure nitrogen discharges and post-discharges”, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **28**, 125-152.
- [69] Hagelaar, G. J. M., Pitchford, L. C. (2005) “Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 722–733.
- [70] Heinlin, J., Isbary, G., Stolz, W., Morfill, G., Landthaler, M., Shimizu, T., Steffes, B., Nosenko, T., Zimmermann, J. L., Karrer, S. (2010) “Plasma applications in medicine with a special focus on dermatology”, *JEADV* **25**, 1–11.
- [71] Hobbs, G. D., Wesson, J.A. (1967) “Heat flow through a Langmuir sheath in the presence of electron emission”, *Plasma Phys.* **9**, 85-87.
- [72] Hollinger, H. B. (1962) “Molecular Chaos and the Boltzmann Equation”, *Journal of Chem. Phys.* **36**, 3208 - 3220.
- [73] Holt, E. H., Haskell, R. E. (1965) “Foundations of Plasma Dynamics”, Macmillan, New York, pp. 510.
- [74] <http://www.zdplaskin.laplace>
- [75] Hurlbatt, A., Gibson, A. R., Schroter, S., Bredin, J., Foote, A. P. S., Grondein, P., O’Connell, D., Gans, T. (2017) “Concepts, Capabilities, and Limitations of Global Models: A Review”, *Plasma Process Polym.* **14**, 1600138.
- [76] Itikawa, Y. (2006) “Cross Sections for Electron Collisions with Nitrogen Molecules”, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* **35**, No. 1.
- [77] Itikawa, Y. (2009) “Cross Sections for Electron Collisions with Oxygen Molecules”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. **38**, No. 1.
- [78] Itikawa, Y., Mason, N. (2005) “Cross Sections for Electron Collisions with Water Molecules”, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. **34**, No. 1

- [79] Karakas, E., Akman, M. A., Laroussi, M. (2012) “The evolution of atmospheric-pressure low-temperature plasma jets: jet current measurements”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 034016.
- [80] Kawaguchi, S., Takahashi, K., Satoh, K., Itoh, H. (2016) “Electron transport analysis in water vapor”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 07LD03.
- [81] Kieft, I. E., v d Laan, E. P., Stoffels, E. (2004) “Electrical and optical characterization of the plasma needle”, *New Journal of Physics* **6**, 149.
- [82] Kim, H.-J., Kwon D.-C., Yoon, N.-S. (2007) “An Efficient Method for One-Dimensional Fluid Simulation of DC Discharge”, *Journal of the Korean Physical Society* **51**, No. 2, 633-636.
- [83] Kim, J., Sakakita, H., Ohsaki, H., Katsurai, M. (2015) “Microwave-excited atmospheric pressure plasma jet with wide aperture for the synthesis of carbon nanomaterials”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 01AA02.
- [84] Kim, S., Lieberman, M. A., Lichtenberg, A. J., Gudmundsson, J. T. (2006) “Improved volume-averaged model for steady and pulsed-power electronegative discharges”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* **24**(6), 2025-2040.
- [85] Kolobov, V. I., Arslanbekov, R. R. (2012) “Towards adaptive kinetic-fluid simulations of weakly ionized plasmas”, *Journal of Computational Physics* **231**, 839–869.
- [86] Kong, M. G., Kroesen, G., Morfill, G., Nosenko, T., Shimizu, T., van Dijk, J., Zimmermann, J. L. (2009) “Plasma medicine: an introductory review”, *New Journal of Physics* **11**, 115012.
- [87] Kossyi, I. A., Kostinsky, A. Y., Matveyev, A. A., Silakov, V. P. (1992) “Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1**, 207-220.
- [88] Kumar, K., Skullerud, H. R., Robson, R. E. (1980) “Kinetic Theory of Charged Particle Swarms in Neutral Gases”, *Aust. J. Phys.* **33**, 343-448.
- [89] Kushner, M. J. (2009) “Hybrid modelling of low temperature plasmas for fundamental investigations and equipment design”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 194013.
- [90] Laroussi, M. (2014) “From Killing Bacteria to Destroying Cancer Cells: 20 Years of Plasma Medicine”, *Plasma Process. Polym.* DOI: 10.1002/ppap.201400152.

- [91] Levko D., Raja L. L. (2017) “Fluid vs. global approach for the modeling of active species production by streamer discharge”, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **26**, 035003.
- [92] Li, Q., Zhu, W-C., Zhu, X-M., Pu, Y-K. (2010) “Effects of Penning ionization on the discharge patterns of atmospheric pressure plasma jets”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 382001.
- [93] Lieberman, M. A., Lichtenberg, A. J. (2005) “Principles of Plasma Discharges and Materials Processing”, 2ed. (John Wiley & Sons, New Jersey).
- [94] Lin, K.-M., Hung, C.-T., Hwang, H.-N., Smith, M.-R., Yang, Y.-W., Wu, J.-S. (2012) “Development of a parallel semi-implicit two-dimensional plasma fluid modeling code using finite-volume method”, *Computer Physics Communications* **183**, 1225–1236.
- [95] Liu X.Y., Pei X. K., Ostrikov K., Lu X. P., Liu D. W. (2014) “The production mechanisms of OH radicals in a pulsed direct current plasma jet”, *Phys. Plasmas*, **21**, 093513.
- [96] Liu, D. X., Bruggeman, P., Iza, F., Rong, M. Z., Kong, M. G. (2010) “Global model of low-temperature atmospheric-pressure He + H₂O plasmas”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 025018.
- [97] Liu, D. X., Iza, F., Wang, X. H., Kong, M. G., Rong, M. Z. (2011) “He+O₂+H₂O plasmas as a source of reactive oxygen species”, *Appl. Phys. Letters* **98**, 221501.
- [98] Liu, D. X., Rong, M. Z., Wang, X. H., Iza, F., Kong, M. G., Bruggeman, P. (2010) “Main Species and Physicochemical Processes in Cold Atmospheric-pressure He + O₂ Plasmas”, *Plasma Process. Polym.* **7**, 846–865.
- [99] Liu, Y., Tan, Z., Chen, X., Li, X., Zhang, H., Pan, J., Wang, X. (2018) “An investigation of the effects of air on electron energy in atmospheric pressure helium plasma jets”, *Phys. Plasmas* **25**, 033514.
- [100] Loureiro, J., Ferreira, C. M., Capitelli, M., Gorse, C., Cacciatore, M. (1990) “Non-equilibrium kinetics in nitrogen discharges: a comparative analysis of two theoretical approaches”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **23**, 1371-1383.
- [101] Lu, X., Laroussi, M., Puech, V. (2012) “On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 034005.

- [102] Makabe, T., Petrović, Z. (2015) "Plasma electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication" 2ed. (Taylor & Francis Group, New York and London).
- [103] Makabe, T., Petrović, Z. Lj. (2002) "Development of optical computerized tomography in capacitively coupled plasmas and inductively coupled plasmas for plasma etching", *Applied Surface Science* **192**, 88 - 114.
- [104] Makabe, T., Tatsumi, T. (2011) "Workshop on atomic and molecular collision data for plasma modelling: database needs for semiconductor plasma processing", *Plasma Sources Sci. Technol.* **20**, 024014.
- [105] Makabe, T., Yagisawa, T. (2011) "Low-pressure nonequilibrium plasma for a top-down nanoproces", *Plasma Sources Sci. Technol.* **20**, 024011.
- [106] Maletić, D. (2018) "Razvoj i dijagnostika atmosferskog plazma mlaza i njegova primena na uzorke biološkog porekla", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet, Beograd.
- [107] Maletić, D., Puač, N., Malović, G., Đorđević, A., Petrović, Z. Lj. (2017) "The influence of electrode configuration on light emission profiles and electrical characteristics of an atmospheric-pressure plasma jet", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 145202.
- [108] Maletić, D., Puač, N., Lazović, S., Malović, G., Gans, T., Schulz-von der Gathen, V., Petrović, Z. Lj. (2012) "Detection of atomic oxygen and nitrogen created in a radio-frequency-driven micro-scale atmospheric pressure plasma jet using mass spectrometry", *Plasma Phys. Contr. Fusion* **54**, 124046.
- [109] Maletić, D., Puač, N., Selaković, N., Lazović, S., Malović, G., Đorđević, A., Petrović, Z. Lj. (2015) "Time-resolved optical emission imaging of an atmospheric plasma jet for different electrode positions with a constant electrode gap", *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 025006.
- [110] Manos, D., Flamm, D. (1989) "Plasma Etching: An Introduction", Academic Press., New York.
- [111] Marić, D. (2006) "Prostorna struktura i osnovni kinetički procesi u gasnim pražnjenjima na niskom pritisku", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet, Beograd.

- [112] Markosyan, A. H., Teunissen, J., Dujko, S., Ebert, U. (2015) “Comparing plasma fluid models of different order for 1D streamer ionization fronts”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 065002.
- [113] Meek, J. M., Craggs, J. D. (1953) “Electrical Breakdown of gases” (Oxford University Press, Amen House, London E.C).
- [114] Mesyats, G. A. (2006) “Similarity laws for pulsed gas discharges”, *Physics-Uspekhi* **49**(10), 1045- 1065.
- [115] Metelmann, H-R., Nedrelow, D. S., Seebauer, C., Schuster, M., vonWoedtke, T., Weltmann, K-D., Kindler, S., Metelmann, P. H., Finkelstein, S. E., VonHoff, D. D., Podmelle, F. (2015) “Head and neck cancer treatment and physical plasma”, *Clinical Plasma Medicine* **3**, 17–23.
- [116] Milić, B. S. (1970) “Statistička fizika”, Naučna knjiga, Beograd.
- [117] Mladenović, Ž., Gocić, S., Marić, D., Petrović, Z. Lj. (2018) “Influence of space charge density on electron energy distribution function and on composition of atmospheric pressure He/O₂/air plasmas”, *Eur. Phys. J. Plus* **133**: 344.
- [118] Mladenović, Ž., Gocić, S., Petrović, Z. Lj. (2019) “Comparisons of Quantemol and Morgan LXCat cross section sets for electron-neutral scattering and rate coefficients: helium and water”, *Facta Universitatis Series: Physics, Chemistry and Technology* Vol. **17**, No 2, 145 – 159.
- [119] Morgan database, www.lxcat.net, retrieved on April 24, 2019.
- [120] Morgan, L. A., Gillan, C. J., Tennyson, J., Chen, X. (1997) “R-matrix calculations for polyatomic molecules: electron scattering by N₂O”, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **30**, 4087–4096.
- [121] Morgan, L. A., Tennyson, J. (1993) “Electron impact excitation cross sections for CO”, *J. Phys. B: At Mol. Opt. Phys.* **26**, 2429-ZMI.
- [122] Morgan, W. L., Penetrante, B. M. (1990) “ELENDF: A time-dependent Boltzmann solver for partially ionized plasmas”, *Comput. Phys. Commun.* **58**, 127-152.
- [123] Murakami T., Niemi K., Gans T., O’Connell D., Graham W. G. (2014) “Afterglow chemistry of atmospheric-pressure helium-oxygen plasmas with humid air impurities”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 025005.

- [124] Murakami, T., Niemi, K., Gans, T., O’Connell, D., Graham, W. G. (2013a) „Chemical kinetics and reactive species in atmospheric pressure helium–oxygen plasmas with humid-air impurities“, *Plasma Sources Sci. Technol.* **22**, 015003.
- [125] Murakami, T., Niemi, K., Gans, T., O’Connell, D., Graham, W. G. (2013b) „Interacting kinetics of neutral and ionic species in an atmospheric-pressure helium–oxygen plasma with humid air impurities“, *Plasma Sources Sci. Technol.* **22**, 045010.
- [126] Mušicki, Đ., Milić, S. B. (1978) “Matematičke osnove teorijske fizike”, Naučna knjiga, Beograd.
- [127] Nakano, N., Shimura, N., Petrović, Z. Lj., Makabe, T. (1994) “Simulations of rf glow discharges in SF₆ by the relaxation continuum model: Physical structure and function of the narrow-gap reactive-ion etcher”, *Phys. Rev. E* **49**, No 5.
- [128] Niemi K., Gans T., O’Connell D. (2013) “Comparison of a global model to semi-kinetic fluid simulations for atmospheric pressure radiofrequency plasmas”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **22**, 032001.
- [129] Niemi, K., Waskoenig, J., Sadeghi, N., Gans, T., O’Connell, D. (2011) “The role of helium metastable states in radio-frequency driven helium–oxygen atmospheric pressure plasma jets: measurement and numerical simulation”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **20**, 055005.
- [130] Norberg, S. A., Johnsen, E., Kushner, M. J. (2015) “Formation of reactive oxygen and nitrogen species by repetitive negatively pulsed helium atmospheric pressure plasma jets propagating into humid air”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 035026.
- [131] Oh, J., Aranda-Gonzalvo, Y., Bradley, J. W. (2011) “Time-resolved mass spectroscopic studies of an atmospheric-pressure helium microplasma jet”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 365202.
- [132] Pancheshnyi, S., Biagi, S., Bordage, M. C., Hagelaar, G. J. M., Morgan, W. L., Phelps, A. V., Pitchford, L. C. (2012) “The LXCat project: Electron scattering cross sections and swarm parameters for low temperature plasma modelling”, *Chemical Physics* **398**, 148-153.

- [133] Park, G. Y., Hong, Y. J., Lee, H. W., Sim, J. Y., Lee, J. K. (2010) “A Global Model for the Identification of the Dominant Reactions for Atomic Oxygen in He/O₂ Atmospheric-Pressure Plasmas”, *Plasma Process. Polym.* **7**, 281–287.
- [134] Park, G., Lee, H., Kim, G., Lee, J. K. (2008) “Global Model of He/O₂ and Ar/O₂ Atmospheric Pressure Glow Discharges”, *Plasma Process. Polym.* **5**, 569–576.
- [135] Park, J., Henins, I., Herrmann, H.-W., Selwyn, G.-S. (2001) “Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source”, *J. Appl. Phys.* **89**, 1, 20-28.
- [136] Passchier, J. D. P., Goedheer, W. J. (1993) “A two-dimensional fluid model for an argon rf discharge”, *J. Appl. Phys.* **74**(6), 3744-3751.
- [137] Petrović, Z. (1997) “Fizika elektronskih rojeva” – Srpska Akademija Nauka i Umetnosti, Elektron – sto godina od otkrića, Sveska šesta, “Elektron u jonizovanim gasovima i elektroni i jezgro atoma”, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 1997.
- [138] Petrović, Z. Lj., Dujko, S., Marić, D., Malović, G., Nikitović, Ž., Šašić, O., Jovanović, J., Stojanović, V., Radenović, M. R. (2009) “Measurement and interpretation of swarm parameters and their application in plasma modelling”, *J. Phys. D* **42**, 194002.
- [139] Petrović, Z. Lj., Raspopović, Z. M., Dujko, S., Makabe, T. (2002) “Kinetic phenomena in electron transport in radio-frequency fields”, *Applied Surface Science* **192**, 1-25.
- [140] Petrović, Z. Lj., Šuvakov, M., Nikitović, Ž., Dujko, S., Šašić, O., Jovanović, J., Malović, G., Stojanović, V. (2007) “Kinetic phenomena in charged particle transport in gases, swarm parameters and cross section data”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **16**, S1.
- [141] Petrović, Z. Lj., Maguire, P., Radmilović-Radenović, M., Radetić, M., Puač, N., Marić, D., Mahony, C., Malović, G. (2010) “On Application of Plasmas in Nanotechnologies”, *Nanotechnology for Electronics, Photonics, and Renewable Energy, Nanostructure Science and Technology*, Springer.
- [142] Phelps, A. V., Petrović, Z. Lj. (1999) “Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **8**, R21–R44.

- [143] Pitchford, L. C., Phelps, A. V. (1981) “Multi-term Boltzmann analysis of electrons in N₂”, Joint Institute for laboratory astrophysics, University of Colorado and National Bureau of standards Boulder, Co 80309, AFWAL-TR-81-2035, Final report for period October 1, 1979 through September 30, 1980.
- [144] Pitchford, L. C., Phelps, A. V. (1982) “Comparative calculations of electron-swarm properties in N₂ at moderate E/N values”, *Phys. Rev. A* **25**, No. 1.
- [145] Puač, N., Maletić, D., Lazović, S., Malović, G., Đorđević, A., Petrović, Z. Lj. (2010) “Current-voltage characteristics of atmospheric pressure plasma jet” *Publ. Astron. Obs. Belgrade* No. **89**, 307-310.
- [146] Puač, N., Maletić, D., Lazović, S., Malović, G., Đorđević, A., Petrović, Z. Lj. (2012) “Time resolved optical emission images of an atmospheric pressure plasma jet with transparent electrodes”, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 024103.
- [147] Puač, N., Petrović, Z. Lj., Malović, G., Đorđević, A., Živković, S., Gibba, Z., Grubišić, D. (2006) “Measurements of voltage–current characteristics of a plasma needle and its effect on plant cells”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 3514–3519.
- [148] Qian M. Y., Yang C. Y., Wang Z. D., Chen X. C., Liu S. Q., Wang D. Z. (2016) “Numerical study of the effect of water content on OH production in a pulsed-dc atmospheric pressure helium-air plasma jet”, *Chin. Phys. B*, **25**(1), 015202.
- [149] Qian M., Li G., Liu S., Zhang Y., Li S., Lin Z., Wang D. (2017) “Effect of pulse voltage rising time on discharge characteristics of a helium-air plasma at atmospheric pressure”, *Plasma Sci. Technol.* **19**, 064015.
- [150] Rafatov, I., Bogdanov, E. A., Kudryavtsev, A. A. (2012) “Account of nonlocal ionization by fast electrons in the fluid models of a direct current glow discharge”, *Phys. Plasmas* **19**, 093503.
- [151] Raizer, Y. P. (1991) “Gas Discharge Physics”, (Springer-Verlag).
- [152] Rauf, S., Kushner, M. J. (1999) “Dynamics of a coplanar-electrode plasma display panel cell. I. Basic operation”, *Journal of Appl. Phys.* **85**, No 7.
- [153] Reece Roth, J. (2001) “Industrial Plasma Engineering Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing”, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia.

- [154] Reuter, S., Winter, J., Iseni, S., Peters, S., Schmidt-Bleker, A., Dünbier, M., Schäfer, J., Foest, R., Weltmann, K-D. (2012) “Detection of ozone in a MHz argon plasma bullet jet”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 034015.
- [155] Robert, E., Sarron, V., Darny, T., Riès, D., Dozias, S., Fontane, J., Joly, L., Pouvesle, J. M. (2014) “Rare gas flow structuration in plasma jet experiments”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 012003.
- [156] Robert, E., Sarron, V., Riès, D., Dozias, S., Vandamme, M. and Pouvesle, J.-M. (2012) “Characterization of pulsed atmospheric-pressure plasma streams (PAPS) generated by a plasma gun”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**(3), 034017.
- [157] Robson, R. E., White, R. D., Petrović, Z. Lj. (2005) “Colloquium: Physically based fluid modeling of collisionally dominated low-temperature plasmas”, *Rev. Mod. Phys.* Vol. **77**, No. 4, 1303-1320.
- [158] Sakiyama, Y., Graves, D. B., Chang, H. W., Shimizu, T., Morfill, G. E. (2012) “Plasma chemistry model of surface microdischarge in humid air and dynamics of reactive neutral species”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 425201.
- [159] Sakiyama, Y., Graves, D. B., Stoffels, E. (2008) “Influence of electrical properties of treated surface on RF-excited plasma needle at atmospheric pressure”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 095204.
- [160] Schröter, S., Gibson, A. R., Kushner, M. J., Gans, T., O’Connell, D. (2018a) “Numerical study of the influence of surface reaction probabilities on reactive species in an rf atmospheric pressure plasma containing humidity”, *Plasma Phys. Control. Fusion* **60**, 014035.
- [161] Schröter, S., Wijaikhum, A., Gibson, A. R., West, A., Davies, H. L., Minesi, N., Dedrick, J., Wagenaars, E., de Oliveira, N., Nahon, L., Kushner, M. J., Paul, B. J., Niemi, K., Gans, T., O’Connell, D. (2018b) “Chemical kinetics in an atmospheric pressure helium plasma containing humidity”, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20**, 24263 - 24286.
- [162] Shekhter, A. B., Kabisov, R. K., Pekshev, A. V., Kozlov, N. P., Perov, Yu. L. (1998) “Experimental and Clinical Validation of Plasmadynamic Therapy of Wounds with Nitric Oxide”, *Bulletin of Experimental Biology and Medicine* **126**, 829 - 834.

- [163] Shimizu, T., Steffes, B., Pompl, R., Jamitzky, F., Bunk, W., Ramrath, K., Georgi, M., Stolz, W., Schmidt, H-U., Urayama, T., Fujii, S., Morfill, G. E. (2008) “Characterization of Microwave Plasma Torch for Decontamination”, *Plasma Process. Polym.* **5**, 577–582.
- [164] Sieck., L. W., Herron, J. T., Green, D. S. (2000) “Chemical Kinetics Database and Predictive Schemes for Humid Air Plasma Chemistry. Part I: Positive Ion–Molecule Reactions”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. **20**, No. 2, 235-258.
- [165] Smirnov, B. M. (2001) “Physics of Ionized Gases”, John Wiley and Sons, Inc. pp. 398.
- [166] Stafford, D. S., Kushner, M. J. (2004) “O₂(¹Δ) production in He/O₂ mixtures in flowing low pressure plasmas”, *Journal of Appl. Phys.* **96**, No. 5, 2451 – 2465.
- [167] Stalder, K. R., Vidmar, R. J., Nersisyan, G., Graham, W. G. (2006) “Modeling the chemical kinetics of high-pressure glow discharges in mixtures of helium with real air”, *Journal of Appl. Phys.* **99**, 093301.
- [168] Stancampiano, A., Selaković, N., Gherardi, M., Puač, N., Petrović, Z. Lj., Colombo, V., (2018) “Characterisation of a multijet plasma device by means of mass spectrometric detection and iCCD imaging”, *J Phys D: Appl Phys.* **51**(48), 484004.
- [169] Sun, B., Liu, D., Iza, F., Wang, S., Yang, A., Liu, Z., Rong, M., Wang, X. (2019a) “Global model of an atmospheric-pressure capacitive discharge in helium with air impurities from 100 to 10 000 ppm”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 035006.
- [170] Sun, B., Liu, D., Wang, X., Liu, Z., Iza, F., Yang, A., Rong, M., (2019b) “Reactive species in cold atmospheric-pressure He+Air plasmas: The influence of humidity”, *Phys. Plasmas* **26**, 063514.
- [171] Surendra, M., Graves, D. B. (1991) “Particle Simulations of Radio-Frequency Glow Discharges”, *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **19**, 2, 144-157.
- [172] Sydorenko, D., Smolyakov, A., Kaganovich, I., Raitses, Y. (2006) “Modification of Electron Velocity Distribution in Bounded Plasmas by Secondary Electron Emission”, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34**, No. 3, 815-824.
- [173] Taccogna, F., Dilecce, G. (2016) “Non-equilibrium in low-temperature plasmas”, *Eur. Phys. J. D* **70**: 251.

- [174] Taccogna, F., Longo, S., Capitelli, M., Schneider, R. (2008) “Surface-Driven Asymmetry and Instability in the Acceleration Region of Hall Thruster”, *Contrib. Plasm. Phys.* **48**, No. 4, 375-386.
- [175] Tennyson, J., Rahimi, S., Hill, C., Tse, L., Vibhakar, A., Akello-Egwel, D., Brown, D. B., Dzarasova, A., Hamilton, J. R., Jaksch, D., Mohr, S., Wren-Little, K., Bruckmeier, J., Agarwal, A., Bartschat, K., Bogaerts, A., Booth, J. P., Goeckner, M. J., Hassouni, K., Itikawa, Y., Braams, B. J., Krishnakumar, E., Laricchiuta, A., Mason, N. J., Pandey, S., Petrović, Z. Lj., Pu, Y. K., Ranjan, A., Rauf, S., Schulze, J., Turner, M. M., Ventzek, P., Whitehead, J. C., Yoon, J. S. (2017) “QDB: a new database of plasma chemistries and reactions”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 055014.
- [176] Turner, M. M. (2015) “Uncertainty and error in complex plasma chemistry models”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **24**, 035027.
- [177] Turner, M. M., Hopkins, M. B. (1992) “Anomalous Sheath Heating in a Low Pressure rf Discharge in Nitrogen”, *Phys. Rev. Letters*, **69**, No. 24, 3511 – 3514.
- [178] Vahedi, V., Birdsall, C. K., Lieberman, M. A., DiPeso, G., Rognlien, T. D. (1993) “Capacitive RF discharges modelled by particle-in-cell Monte Carlo simulation. II: comparisons with laboratory measurements of electron energy distribution functions”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **2**, 273-278.
- [179] Van Gaens, W., Bogaerts, A. (2013) “Kinetic modelling for atmospheric pressure argon plasma jet in humid air”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 275201.
- [180] Van Gaens, W., Bogaerts, A., (2014) “Reaction pathways of biomedically active species in an Ar plasma jet”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 035015.
- [181] Van Gessel, A. F. H., Hrycak, B., Jasinski, M., Mizeraczyk, J., Van der Mullen, J. J. A. M., Bruggeman, P. (2013) “Temperature and NO density measurements by LIF and OES on an atmospheric pressure plasma jet”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 095201.
- [182] Verreycken T., Bruggeman P. J. (2014) “OH Dynamics in a Nanosecond Pulsed Plasma Filament in Atmospheric Pressure He–H₂O upon the Addition of O₂”, *Plasma Chem. Plasma Process.* **34**, 605-619.
- [183] Vidmar, R. J., Stalder, K. R. (2004) “Computations of the power to sustain plasma in air with relevance to aerospace technology”, Final report prepared for Air Force

Office of Scientific Research. Report, No: AFRISRARRE040123. Contact No. F49620-01-0414.

- [184] Von Keudell, A., Schulz-von der Gathen, V. (2017) “Foundations of low-temperature plasma physics—an introduction”, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 113001.
- [185] VonWoedtke, T., Metelmann, H-R., Weltmann, K-D. (2014) “Clinical Plasma Medicine: State and Perspectives of in Vivo Application of Cold Atmospheric Plasma”, *Contrib. Plasma Phys.* **54**, 104 – 117.
- [186] Weltmann, K-D., vonWoedtke, T. (2017) “Plasma medicine—current state of research and medical application”, *Plasma Phys. Control. Fusion* **59**, 014031.
- [187] Wetlmann, K-D., Kindel, E., Brandenburg, R., Meyer, C., Bussiahn, R., Wilke, C., von Woedtke, T. (2009) “Atmospheric Pressure Plasma Jet for Medical Therapy: PlasmaParameters and Risk Estimation”, *Contrib. Plasma Phys.* **49**, No. 9, 631 – 640.
- [188] Wetlmann, K-D., Kindel, E., von Woedtke, T., Hähnel, M., Stieber, M., Brandenburg, R. (2010) “Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine”, *Pure Appl. Chem.* **82**, No. 6, 1223–1237.
- [189] White, R. D., Brunger, M. J., Garland, N. A., Robson, R. E., Ness, K. F., Garcia, G., de Uguijo, J., Dujko, S., Petrović, Z. Lj. (2014) “Electron swarm transport in THF and water mixtures”, *Eur. Phys. J. D* **68**: 125.
- [190] White, R. D., Cocks, D., Boyle, G., Casey, M., Garland, N., Konovalov, D., Philippa, B., Stokes, P., de Uguijo, J., Gonzalez-Magana, O., McEachran, R. P., Buckman, S. J., Brunger, M. J., Garcia, G., Dujko, S., Petrovic, Z. Lj. (2018) “Electron transport in in biomolecular gaseous and liquid systems: theory, experiment and self-consistent cross-sections”, *Plasma Sources. Sci. Technol.* **27**, 053001.
- [191] White, R. D., Robson, R. E., Dujko, S., Nicoletopoulos, P., Li, B. (2009), “Recent advances in the application of Boltzmann equation and fluid equation methods to charged particle transport in non-equilibrium plasmas”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42**, 194001.

- [192] White, R. D., Robson, R. E., Schmidt, B., Morrison, M. A. (2003) “Is the classical two-term approximation of electron kinetic theory satisfactory for swarms and plasmas?”, *J Phys D: Appl Phys.* **36**, 3125-3131.
- [193] Winters, H. F., Coburn, J. W. (1992) “Surface science aspects of etching reactions”, *Surface Science Reports* **14**, 161 - 269.
- [194] Wu, S., Xu, H., Lu, X., Pan, Y. (2012) “Effect of Pulse Rising Time of Pulse dc Voltage on Atmospheric Pressure Non-Equilibrium Plasma”, *Plasma Process. Polym.* **10**, 136–140.
- [195] Yang, Y. (2003) “Direct Non-oxidative Methane Conversion by Non-thermal Plasma: Modeling Study”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. **23**, No. 2, 327 – 346.
- [196] Yonemori S., Nakagawa, Y., Ono R., Oda, T. (2012) “Measurement of OH density and air–helium mixture ratio in an atmospheric-pressure helium plasma jet”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 225202.
- [197] Yousfi, M., Benabdessadok, M. D. (1996) “Boltzmann equation analysis of electronmolecule collision cross sections in water vapor and ammonia”, *J. Appl. Phys.* **80**, 6619-6630.
- [198] Zhang. S., Van Gaens, W., Van Gessel, B., Hofmann, S., Van Veldhuizen, E., Bogaerts, A., Bruggeman, P. (2013) “Spatially resolved ozone densities and gas temperatures in a time modulated RF driven atmospheric pressure plasma jet: an analysis of the production and destruction mechanisms”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 205202.

BIOGRAFIJA AUTORA

Željko Mladenović je rođen 18. maja 1989. godine u Pirotu, Republika Srbija. Osnovnu školu “Vuk Stefanović Karadžić” u Pirotu završio je 2004. godine i gimnaziju, prirodno-matematički smer, 2008. godine, kao nosilac Vukove diplome.

Osnovne akademske studije fizike, na Departmanu za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, upisao je školske 2008/2009. godine i završio u roku, školske 2010/2011. sa prosečnom ocenom 10,00 (deset). Master akademske studije fizike, na smeru Opšta fizika, Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, upisao je školske 2011/2012. i završio u roku, školske 2012/2013. sa prosečnom ocenom 10,00 (deset). Master rad pod nazivom “Odziv superprovodnog oscilatornog kola na pobudne signale impulsnog tipa” odbranio je 16. septembra 2013. godine na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu sa ocenom 10. Kao student završne godine osnovnih i master akademskih studija bio je stipendista Fonda za mlade talente Republike Srbije u okviru Ministarstva omladine i sporta Republike Srbije (naziv stipendije “Dositeja”). Dobitnik je nagrade “Srebrni znak Univerziteta”, kao najbolji student Univerziteta u Nišu za školsku 2012/2013. godinu.

Doktorske akademske studije, na smeru *Fizika jonizovanog gasa i plazme i tehnologija plazme*, na Fizičkom fakultetu u Beogradu, upisao je školske 2013/2014. Položio je sve ispite propisane studijskim programom sa prosečnom ocenom 10,00 (deset) i ostvario ukupno 150 ESPB bodova. Školske 2020/2021. reupisan je na Doktorske akademske studije Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, na studijskom programu Fizika.

Kao student druge godine master studija izabran je u zvanje Saradnika u nastavi na Departmanu za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, i držao je računске vežbe na Osnovnim akademskim studijama Fizike školske 2012/2013. godine iz predmeta *Elektromagnetizam*, *Optika* i *Osnovi fizike čvrstog stanja*. Nakon završetka master studija bio je biran u zvanje Asistenta na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu za užu naučnu oblast *Teorijska fizika*. Držao je računске i laboratorijske vežbe iz sledećih predmeta:

- *Elektromagnetizam* (OAS, 2013/2014);

- *Optika* (OAS, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020);
- *Osnovi statističke fizike* (OAS, 2013/2014);
- *Osnovi fizike čvrstog stanja* (OAS, 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018);
- *Elektrodinamika* (MAS, modul Opšta fizika 2015/2016);
- *Statistička fizika* (MAS, modul Opšta fizika i modul Primjenjena fizika, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020);
- *Osnovi fizike plazme* (MAS, modul Opšta fizika i modul Primjenjena fizika, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020);
- *Fizika čvrstog stanja* (MAS, modul Opšta fizika i modul Primjenjena fizika, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020);
- *Klasična teorijska fizika* (MAS, modul Matematički modeli u fizici, 2015/2016, 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020).

BIBLIOGRAFIJA AUTORA

Radovi u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21)

Željko Mladenović, Saša Gocić, Dragana Marić, Zoran Lj. Petrović, “Influence of space charge density on electron energy distribution function and on composition of atmospheric pressure He/O₂/air plasmas”, European Physical Journal Plus , (2018) vol. **133**: 344.

Radovi u međunarodnim časopisima (M23)

Saša Gocić, Željko Mladenović, “Global model simulation of OH production in pulsed-DC atmospheric pressure helium-air plasma jets”, Open Physics, (2018) vol. **16**, 375.

Radovi u vrhunskim časopisima od nacionalnog značaja (M51)

Ž. Mladenović, S. Gocić, Z. Lj. Petrović, “Comparisons of Quantemol and Morgan LXCat cross section sets for electron-neutral scattering and rate-coefficients: helium and water”, FACTA UNIVERSITATIS Series: Physics, Chemistry and Technology (2019) Vol. **17**, No 2, 145 - 159.

Saopštenja na naučnim skupovima međunarodnog značaja štampana u celini (M31)

Željko Mladenović, Saša Gocić, Dragana Marić, Zoran Lj. Petrović, “Influence of electron energy distribution function on composition of atmospheric pressure He/O₂ plasmas”, 28th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG 2016), pp 356 - 359, Belgrade., (M30) (2016) 356.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

ПРИМЕНА ГЛОБАЛНИХ МОДЕЛА У АНАЛИЗИ ФИЗИЧКИХ И ХЕМИЈСКИХ ПРОЦЕСА У НИСКОТЕМПЕРАТУРНИМ ПЛАЗМАМА НА АТМОСФЕРСКОМ ПРИТИСКУ

која је одбрањена на Природно-математичком факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 14. 01. 2021.

Потпис аутора дисертације:


Жељко Младеновић

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**


Наслов дисертације:

**ПРИМЕНА ГЛОБАЛНИХ МОДЕЛА У АНАЛИЗИ ФИЗИЧКИХ И ХЕМИЈСКИХ
ПРОЦЕСА У НИСКОТЕМПЕРАТУРНИМ ПЛАЗМАМА НА АТМОСФЕРСКОМ
ПРИТИСКУ**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 14.01.2021.

Потпис аутора дисертације:


Жељко Младеновић

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

ПРИМЕНА ГЛОБАЛНИХ МОДЕЛА У АНАЛИЗИ ФИЗИЧКИХ И ХЕМИЈСКИХ ПРОЦЕСА У НИСКОТЕМПЕРАТУРНИМ ПЛАЗМАМА НА АТМОСФЕРСКОМ ПРИТИСКУ

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 14. 01. 2021.

Потпис аутора дисертације:


Жељко Младеновић