

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

**MODELIRANJE I SIMULACIJA ONEČIŠĆENJA ZRAKA  
NAD ŠIRIM RIJEČKIM PODRUČJEM**

**Magistarski rad**

**Marko Čavrak**

**Rijeka, 2006.**



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

**MODELIRANJE I SIMULACIJA ONEČIŠĆENJA ZRAKA  
NAD ŠIRIM RIJEČKIM PODRUČJEM**

**Magistarski rad**

**Marko Čavrak**

**Mentor: Red. Prof. dr. sc. Zoran Mrša, dipl. ing.**

**Rijeka, 2006.**

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET  
Povjerenstvo za poslijediplomske studije i doktorate znanosti

U Rijeci, 9. prosinca, 2005.

### ZADATAK ZA MAGISTARSKI RAD

Pristupnik: MARKO ČAVRAK (mat. br. 44-14-XXV)

Naslov rada: **MODELIRANJE I SIMULACIJA ONEČIŠĆENJA ZRAKA NAD ŠIRIM RIJEČKIM PODRUČJEM**

Opis zadatka:

Modeliranje kvalitete zraka nad određenim područjem omogućuje uvid u atmosferske procese kojima se onečišćivači proizašli iz kompleksnog sustava prizemnih izvora onečišćenja naročito industrijskih sistema i cestovnog transporta stvaraju, prenose, mijenjaju, deponiraju i time utječu na dinamiku okoliša. Na taj način može se procijeniti utjecaj topologije terena, vremenskih uvjeta te pojedinog onečišćivača na kvalitetu zraka nad određenim područjem.

U tu svrhu potrebno je evaluirati združeni jednoatmosferski model kvalitete zraka sa meteorološkim predprocesorom nad kompleksnim terenom, poznatim katastrom onečišćivača te njihovih emisija, a za različite vremenske uvjete i periode.

Numeričke simulacije izvesti na poznatim testnim primjerima kao i na realnim primjerima.

Zadatak zadan: 9. prosinca 2005.

Rad predan: 1. rujna 2006.

Voditelj magistarskog rada:

red. prof. dr.sc. Zoran Mrša

Predsjednik Povjerenstva za poslijediplomske studije i doktorate znanosti:

red. prof. dr. sc. Senka Maćešić, prof.

## SAŽETAK

Visoke koncentracije zračnih onečišćavala snažno utječu na ekosustav i ljudsko zdravlje. Modeliranje onečišćenja zraka postalo je esencijalno za razumijevanja atmosferskih procesa pri kojima emisije onečišćujućih tvari iz industrijskih kompleksa, cestovnog transporta i ostalih izvora emisija utječu na dinamiku okoliša. Ovaj magistarski rad prikazuje uspješnu operativnu implementaciju modelirajućeg sustava MM5-SMOKE-CMAQ kao korisnog alata pri određivanju razine kakvoće zraka nad regionalnim i urbanim područjem. Mezoskalni meteorološki model MM5 je primijenjen kako bi pripremio meteorološka polja varijabli stanja atmosfere na temelju provedenog regionalnog meteorološkog modeliranja. Priprema emisija izvršena je prikupljanjem inventara emisija i provođenjem emisijskog modeliranja korištenjem SMOKE sustava za pripremu emisija, a u svrhu definiranja prizemnih izvornih vrijednosti onečišćavala za modeliranje kakvoće zraka. CMAQ-ov kemijski transportni model je korišten kako bi udružio sve navedene sustave za modeliranje i proveo simulaciju kemijskih atmosferskih procesa te putem transporta i taloženja u konačnici odredio trodimenzionalna polja koncentracija primarnih i sekundarnih onečišćavala zraka. Simulacija je provedena za vremenski period s visokom razinom troposferskog ozona tijekom 2005. godine. Analizirane su prostorne i vremenske rezolucije modela te utvrđena optimalna veličina računalnih domena i rezolucija numeričkih mreža kako bi omogućila uvid u mezoskalne i lokalne meteorološke fenomene nad područjem izrazito kompleksne orografije. Koristeći prikupljene rezultate mjerjenja iz desetak mjernih stanica u okolini Rijeke izvršena je evaluacija sustava za modeliranje kakvoće zraka MM5-SMOKE-CMAQ. U zaključku je prikazana ocjena provedenog istraživanja i smjernice za daljnja istraživanja.

## ABSTRACT

The high levels of air pollutants have a strong influence both on ecosystems and human health. Air quality modelling is becoming essential to understand atmospheric processes under which the pollution from industrial complexes, road traffic and other emission sources influence the dynamics of environment. In this master thesis a coupled multiscale-nested air quality modelling system MM5-SMOKE-CMAQ was implemented as a useful tool to assess regional air quality issues. Mesoscale meteorological model MM5 was applied to simulate regional-scale meteorology, hence obtaining meteorological state variables (velocity vectors, pressure, humidity, temperature and other derived variables). Emission modelling system SMOKE was used to generate gridded emissions data from temporal and spatial distribution of point and area sources. Finally, the CMAQ chemical transport model was used to ensemble all pre-generated data to simulate chemical processes, transport and deposition of primary and secondary pollutants. Modelling was conducted for a period of high ozone levels during summertime of 2005 and 2006. Measured data from 10 stations in Rijeka's wider area were collected and compared against results of simulations under different modelling parameters. Different spatial and temporal model resolutions were analyzed and conclusion that high resolution is necessary for describing and capturing mesoscale phenomena over complex terrain area were derived. The work concludes with future research proposals.



## PREDGOVOR

Jedan od najvećih problema današnjice je zasigurno onečišćenje zraka, a modeliranje onečišćenja zraka, upotrebom sofisticiranih matematičkih modela, jedan od načina procjenjivanja njegove razine. Na taj način omoguće se pored uviđanja odgovornih fizikalnih i kemijskih procesa za nastanak povišenih razina onečišćenja u zraku i kontroliranje onečišćenosti u svrhu očuvanja okoliša te pravovremeno informiranje stanovništva o eventualnim za ljude kritičnih razina onečišćenosti zraka. Upravo to je i glavni motiv koji me je potaknuo da onečišćenje zraka i okoliša te postupke procjenjivanja i smanjivanja njihove razine odaberem kao područje svoga znanstvenog rada.

Iznimno mi je drago spomenuti da sam tijekom cijelog perioda nastanka ovog rada naišao na razumijevanje svih osoba iz moje radne okoline i moje cijele obitelji. Zahvaljujem se svom profesoru i mentoru, red. prof. dr. sc. Z. Mrši na usmjeravanju i vođenju tijekom cijelog perioda nastanka ovog rada te na poticanju širenja i povezivanja spoznaja iz različitih znanstvenih područja obuhvaćenih ovim magistarskim radom. Zahvaljujem se svojim kolegama Zoranu Čariji i Ladu Kranjčeviću na korisnim savjetima.

Posebnu zahvalu upućujem mojoj ženi Jasmini te mojoj roditeljima i bratu na neizmjernoj podršci.



# SADRŽAJ

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>PROCESI KOJI UTJEĆU NA KAKVOĆU ZRAKA</b>	<b>3</b>
1.1.1	IZVORI ONEČIŠĆENJA I NJIHOVE EMISIJE	3
1.1.2	TROPOSFERSKI FOTOKEMIJSKI PROCESI	4
1.1.2.1	Fotodisocijacija	5
1.1.2.2	Osnovni kemijski procesi plinovitih spojeva	6
1.1.2.3	Osnovni heterogeni kemijski procesi	7
1.1.3	UTJECAJ METEOROLOŠKIH UVJETA NA KAKVOĆU ZRAKA	9
1.1.3.1	Transport i disperzija vjetrom	10
1.1.3.2	Atmosferska stabilnost	11
1.1.3.3	Grebeni visokog i doline niskog tlaka	12
1.1.3.4	Oblaci, magle i padaline	13
1.1.3.5	Topografski utjecaji	14
<b>1.2</b>	<b>ZAKONSKA PODLOGA PRAĆENJU I PROCIJENI ONEČIŠĆENJA ZRAKA U REPUBLICI HRVATSKOJ</b>	<b>15</b>
1.2.1	KONVENCIJA O DALEKOSEŽNOM PREKOGRANIČNOM ONEČIŠĆENJU ZRAKA CLRTAP	15
1.2.1.1	EMEP program	16
1.2.1.2	Obveze prema ostalim protokolima CLRTAP konvencije	17
1.2.2	EUROPSKA AGENCIJA ZA OKOLIŠ EEA I EUROPSKI REFERENTNI CENTAR ZA ONEČIŠĆENJE ZRAKA ETC/AE	17
1.2.3	UNFCCC/IPCC I KYOTO PROTOKOL	18
1.2.4	HRVATSKI I EUROPSKI ZAKONI, UREDBE I PRAVILNICI	19
1.2.5	PRAĆENJE I PROCJENJIVANJE ONEČIŠĆENJA PREMA ZAKONU O ZAŠTITI ZRAKA (NN 178/04.)	20
1.2.5.1	Državna mreža za trajno praćenje kakvoće zraka na teritoriju Republike Hrvatske	21
<b>1.3</b>	<b>PREDVIĐANJE KAKVOĆE ZRAKA</b>	<b>22</b>
1.3.1	METODA USTRAJNOSTI	22

1.3.2	KLIMATOLOŠKA METODA	23
1.3.3	METODA KRITERIJA	23
1.3.4	KLASIFIKACIJSKO I REGRESIJSKO STABLO (CART)	23
1.3.5	REGRESIJSKE JEDNADŽBE	23
1.3.6	FENOMENOLOŠKA METODA – METODA INTUICIJE	23
1.3.7	MODELIRANJE KAKVOĆE ZRAKA	24
1.3.7.1	Meteorološki modeli	25
1.3.7.2	Modeliranje emisija onečišćenja	25
1.3.7.3	Kemijski transportni modeli	26
<b>1.4</b>	<b>CILJ MAGISTARSKOG RADA</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>ODABIR FOTOKEMIJSKI SPECIFIČNE EPIZODE ZA MODELIRANJE KAKVOĆE ZRAKA NAD RIJEČKIM PODRUČJEM</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>27. – 31. 7. 2005. : EPIZODA ZA EVALUACIJU SUSTAVA MODELIRANJA KAKVOĆE ZRAKA</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>METEOROLOŠKO MODELIRANJE</b>	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>UVOD</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>MM5 - SUSTAV ZA METEOROLOŠKO MEZOSKALNO MODELIRANJE</b>	<b>37</b>
3.2.1	DEFINIRANJE SIMULACIJSKIH DOMENA ( <i>TERRAIN</i> )	38
3.2.2	PROCESIRANJE GLOBALNIH METEOROLOŠKIH POLJA (REGRID)	40
3.2.3	DEFINIRANJE INICIJALNIH I RUBNIH UVJETA (INTERPF)	40
3.2.4	NEHIDROSTATSKI METEOROLOŠKI MEZOSKALNI MODEL (MM5)	42
3.2.4.1	Jednadžbe MM5 meteorološkog modela	42
3.2.4.2	Diskretizacija jednadžbi MM5 meteorološkog modela	44
<b>3.3</b>	<b>DEFINIRANJE RAČUNSKIH MEZOSKALNIH DOMENA</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>REZULTATI PROVEDENIH SIMULACIJA I NUMERIČKIH EKSPERIMENTA</b>	<b>47</b>
3.4.1	ANALIZA HORIZONTALNE REZOLUCIJE DOMENA	48
3.4.2	ANALIZA VERTIKALNE REZOLUCIJE DOMENA	55
3.4.3	ANALIZA VELIČINE RAČUNSKIH DOMENA	57

<b>3.5 ZAKLJUČAK</b>	<b>60</b>
<b>4 PRIPREMA I PROCESIRANJE EMISIJA</b>	<b>61</b>
<b>4.1 UVOD</b>	<b>61</b>
<b>4.2 SMOKE - SUSTAV ZA PROCESIRANJE EMISIJA</b>	<b>61</b>
4.2.1 PRIPREMA INVENTARA I PROSTORNA RASPODJELA EMISIJA	63
4.2.1.1 Inventar emisija	63
4.2.1.2 Kategorizacija izvora emisija	63
4.2.1.3 Priprema i prostorna raspodjela emisija za domenu D1	64
4.2.1.4 Priprema i prostorna raspodjela emisija za domenu D2	68
4.2.1.4.1 <i>Točkasti izvori emisija</i>	68
4.2.1.4.2 <i>Pokretni izvori emisija</i>	68
4.2.2 KEMIJSKO RAZVRSTAVANJE EMISIJA	72
4.2.2.1 Razvrstavanje emisija iz stacionarnih točkastih i netočkastih izvora	73
4.2.2.2 Razvrstavanje emisija iz pokretnih cestovnih izvora	76
4.2.3 VREMENSKA RASPODJELA EMISIJA	77
<b>4.3 PRIKAZ IZLAZNIH DATOTEKA I DISKUSIJA</b>	<b>81</b>
<b>5 MODELIRANJE KAKVOĆE ZRAKA</b>	<b>85</b>
<b>5.1 UVOD</b>	<b>85</b>
<b>5.2 CMAQ – SUSTAV ZA MODELIRANJE KAKVOĆE ZRAKA</b>	<b>86</b>
5.2.1 STRUKTURA CMAQ SUSTAVA	86
5.2.1.1 MCIP – Meteorološki kemijski procesor	87
5.2.1.2 JPROC – Procesor parametara fotodisocijacije	87
5.2.1.3 ICON i BCON – Procesor inicijalnih i rubnih koncentracija onečišćujućih tvari	88
5.2.2 CCTM - KEMIJSKI TRANSPORTNI MODEL	89
5.2.2.1 Horizontalna i vertikalna advekcija	91
5.2.2.2 Horizontalna i vertikalna difuzija. Suha depozicija	91
5.2.2.3 Aerosolni procesi	93
5.2.2.4 Ostali procesi	93
5.2.3 REAKCIJE PLINOVITIH SPOJEVA. CARBON-BOND IV KEMIJSKI MEHANIZAM	94

<b>5.3</b>	<b>PRIKAZ REZULTATA</b>	<b>95</b>
<b>5.4</b>	<b>USPOREDBA MODELIRANIH I MJERENIH VELIČINA</b>	<b>102</b>
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČAK</b>	<b>109</b>
<b>LITERATURA</b>		<b>111</b>
<b>POPIS SLIKA</b>		<b>115</b>
<b>POPIS TABLICA</b>		<b>119</b>
<b>POPIS OZNAKA</b>		<b>121</b>
<b>PRILOZI</b>		<b>125</b>
<b>A. GRANIČNE I KRITIČNE VRIJEDNOSTI TE RAZINE PROCJENJIVANJA ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI U ZRAKU PREMA ZAKONU O ZAŠTITI ZRAKA (NN 178/04)</b>		<b>125</b>
<b>B. ZAKONI ATMOSFERSKOG GIBANJA</b>		<b>127</b>
<b>B.1</b>	<b>JEDNADŽBA APSOLUTNOG GIBANJA</b>	<b>127</b>
<b>B.2</b>	<b>JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA</b>	<b>130</b>
B.2.1	RELATIVNA I APSOLUTNA BRZINA GIBANJA	130
B.2.2	CENTRIFUGALNI POTENCIJAL	132
B.2.3	JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA U GENERALIZIRANOM KOORDINATNOM SUSTAVU	132
B.2.4	JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA U ORTOGONALNOM KOORDINATNOM SUSTAVU	133
B.2.5	RASTAVLJANJE JEDNADŽBE RELATIVNOG GIBANJA	135
B.2.6	JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA U STEREOGRAFSKOM KARTEZIJEVOM KOORDINATNOM SUSTAVU	136



## 1 UVOD

Zagađenje okoliša je jedan od najvećih problema s kojim se susreće današnje stanovništvo. Bez obzira odnosilo se na zrak, vodu ili zemlju, zagađenje, prema definiciji, predstavlja degradaciju, tj. gubitak na kakvoći s izrazitim posljedicama na okoliš. Proteklih nekoliko desetljeća, paralelno nagloj urbanizaciji i industrijskom razvoju, povećavala se i količina emisija u okoliš putem zraka, vode ili konzerviranjem otpada na otvorenim ili zatvorenim otpadnim deponijima. Međutim, s obzirom na broj evidentiranih zdravstvenih problema kod ljudi i biljaka, a time i na evidentirano smanjivanje osnovnih za život i održivi razvoj planeta potrebnih sredstava, zagađenje zraka daleko premašuje svaki drugi oblik zagađenja. Bitno je istaknuti da se onečišćenje zraka može promatrati sa stanovišta otvorenih i zatvorenih prostora u kojima čovjek boravi. Naime, kada se govori o onečišćenju zraka tada ga se najčešće limitira i poistovjećuje s ambijentalnim zrakom, tj. zrakom u otvorenom prostoru. Značajna onečišćenja zraka također mogu nastupiti i unutar zatvorenih prostora, poput uredskih ili kućnih prostora, a kao posljedica ljudskih ovisnosti (pušenje, itd.) ili neopreznog i neodgovornog ponašanja, ali i kao posljedica slučajnih, nepredvidljivih događaja (zastarjele instalacije, zamor materijala, itd.). Takav oblik zagađenja je lokalnog karaktera (nekoliko desetaka ili stotinjak metara) i vremenski izrazito brzog djelovanja. Ipak, onečišćenja zraka u otvorenim prostorima ima daleko veći prostorni utjecaj, duži vijek trajanja, višestrukost izvora i na kraju, za očuvanje okoliša najbitniju odrednicu, mogućnost prognoziranja razine onečišćenja.

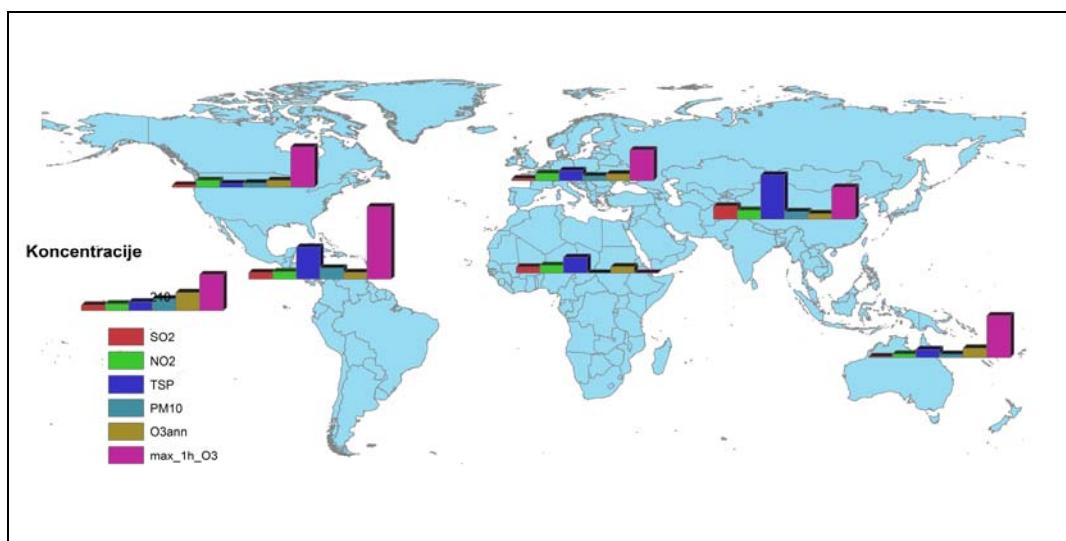


Sl. 1.1 Fotokemijski smog nad Londonom (15. lipnja 2005.g.)

Kako bi do onečišćenja zraka uopće došlo, potrebno je emitirati određenu onečišćujuću tvar u atmosferu. Povjesno gledano izvori zračnog zagađenja datiraju još od prahistorije, vremena kada je čovjek otkrio vatru. Dim koji nastaje pri nepotpunom izgaranju drva bio je stalna prijetnja špiljskom čovjeku. Zabilježeni su i komentari rimskog filozofa Seneke iz 61. g. n. e.: «*Čim sam pobjegao iz te turobne atmosfere grada (Rima) i toga*

*odvratnog mirisa iz zadimljenih kuhinja koje, kad se koriste, ispuštaju pogubnu mješavinu dima i čade, opazio sam koliko je moje zdravlje narušeno».* Tijekom 18. stoljeća započinje sječa šuma i proizvodnja ugljena kao gorivog sredstva, što dovodi do nove dimenzije zagađenja zraka. Godine 1257. engleska kraljica Eleanor protestira kako je Nottingham prezadimljen i time nenastanjiv te se odlučuje preseliti se u Tutbury Castle četrdesetak kilometara dalje u potrazi za čistim zrakom. Onečišćenje dimom iz kućnih ložišta postaje najveći problem tadašnjice te 1273. g. u Londonu biva donesen prvi zakon o snižavanju količine dima i zabrani korištenja ugljena, poznati *The First Smoke Abatement Law*. Temelje današnjeg, modernog poimanja atmosferskog onečišćenja, postavila je industrijska revolucija s početka 19. stoljeća razvojem niza novih industrijskih procesa (prerada i distribucija fosilnih goriva, termoenergetska postrojenja, razvoj cestovnog transporta, proizvodnja otapala, boja i drugih kemijskih sredstava, povećana poljoprivredna proizvodnja, itd.).

Povećana količina potencijalno opasnih plinova te krutih i tekućih čestica svakodnevno se na globalnoj razini emitira i formira u atmosferi. Tijekom osamdesetih godina dvadesetog stoljeća postalo je jasno da je promijenjeni sastav atmosfere narušio osnovne procese koji su za atmosferu i njeno funkcioniranje od fundamentalnog značaja. S obzirom na svoj dinamični karakter atmosfera je samim svojim postojanjem omogućila širenje onečišćenja od njenog lokalnog izvora preko regionalnih područja na globalnu, interkontinentalnu razinu. *Kisele kiše*, uzrokovane povećanim atmosferskim koncentracijama sumpornih oksida nastalih zbog intenzivnog iskoriščavanja visokosumpornih fosilnih goriva pri proizvodnji električne energije u klasičnim termoelektranama, naročit su pokazatelj utjecaja atmosferske horizontalne advekcije na transport sumpornih oksida. Nastanak *fotokemijskog smoga*, odnosno povećanih koncentracija ozona  $O_3$ , za vrijeme atmosferski stabilnog vremena, posljedica je fotokemijskih reakcija plinovitih spojeva emitiranih u atmosferu iz prizemnih izvora onečišćenja, terenske konfiguracije koja ograničava horizontalna kretanja zraka i temperaturne inverzije spuštanja (*subsidiencije*) koja brani vertikalnu disperziju onečišćavala. Takve pojave obilježene su ekstremnim pomanjkanjem vidljivosti. Više od sto godina London (Sl. 1.1) i Los Angeles bilježe ekstremne pojave smoga, tj. onečišćenih magli. Predstavljena dva primjera samo su dio cjelokupnog utjecaja atmosfere putem disperzije, difuzije i ostalih klimatskih i kemijskih procesa na onečišćenje atmosfere.



Sl. 1.2. Prosječne godišnje koncentracije onečišćenja zraka po kontinentima izražene i normalizirane prema  $\text{max } 1\text{h } O_3$  od  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Danas svaki grad posjeduje određene vremenske preduvjete (terenska konfiguracija, periodične vremenske pojave, itd.), blizinu industrijski iskorištenih površina i gusti cestovni promet koji zajedno čine veliki problem za lokalnu kakvoću zraka. To nije slučaj samo s razvijenim zemljama (Sjeverna Amerika, Europa ili Japan), već i u gradovima zemalja u razvoju poput Mexico Cityja, Santiago de Chilea, Kaira, Bangkoka, itd. Iz geografske usporedbe najznačajnijih onečišćavala zraka (Sl. 1.2) vidljivo je da povišene koncentracije  $SO_2$  uglavnom imaju zemlje u razvoju s obzirom na zastarjelu ili nikakvu primjenu industrijskih metoda redukcije  $SO_2$ .  $NO_2$  je problem jednoliko prisutan u cijelom svijetu zbog raširenosti primjene raznolikih transportnih sredstava koja koriste fosilna goriva. Ukupne suspendirane čestice (*TSP*) imaju vrijednosti koje su iznad prosjeka samo u slabo razvijenim zemljama. Kao i za  $NO_2$ , koncentracije  $O_3$  su problem prisutan u cijelom svijetu. Vidljivo je iz posljednje kolone kako su maksimalne satno osrednjene vrijednosti prizemnih koncentracija ozona problem prisutan u cijelome svijetu. Prema tome može se zaključiti kako je najvažniji svjetski problem onečišćenja zraka upravo povezan s povećanim koncentracijama čestica (*PM10*), dušikovog dioksida  $NO_2$  i ozona  $O_3$ .

## 1.1 Procesi koji utječu na kakvoću zraka

Koncentracije onečišćenja zraka pod direktnim su utjecajem vremenskih uvjeta i klimatskih procesa. Kako bismo mogli kvalitetno provoditi predviđanja razine onečišćenja u zraku te razumjeli mehanizme kojima vremenske prilike utječu na onečišćenje, potrebno je utvrditi na koji način nastaje onečišćenje i locirati njegove prizemne izvore.

### 1.1.1 Izvori onečišćenja i njihove emisije

Emisije onečišćivača zraka se najčešće dijele na suspendirane čestične tvari i plinovite spojeve, iako postoje i drugi manje značajni faktori koji utječu na kvalitetu zraka kao npr., zvuk, toplina, ionska radijacija, elektromagnetska polja povezana s distribucijom i upotrebom električne energije.

Za razliku od plinova, čestične tvari uključuju krutu i tekuću fazu. Kada se čestice rasprše u atmosferi, nastaje suspenzija koju nazivamo *aerosol*. Aerosoli uključuju TSP (čestice potpuno suspendirane u zraku; *total suspended particles*), *PM10* (čestice sa srednjim aerodinamičnim promjerom manjim od 10  $\mu\text{m}$ ), *PM2.5* (čestice sa srednjim aerodinamičnim promjerom manjim od 2.5  $\mu\text{m}$ ), sitne i ultra sitne čestice, ispušne čestice od dizel goriva, lebdeći ugljeni pepeo, mineralne prašine (npr. ugljena, vapnenačka, cementna prašina), metalne prašine i pare (npr. cinkova, bakrena, željezna, olovna prašina), kisele maglice (npr. sumporne kiseline), fluoridne čestice, pigmenti boja, pesticidne maglice i mnoge druge. Aerosoli nastaju na različite načine. Metalni prah nastaje kondenzacijom metalne pare, prašina nastaje fragmentacijom materijalnih stvari, maglice raspršivanjem tekućina ili kondenzacijom parovitih tvari, a dim nepotpunim izgaranjem organske tvari. Moguće je zaključiti kako aerosoli u većini slučajeva nastaju u atmosferi što ih čini **sekundarnim onečišćavala** dok tek njihov manji dio (**primarnih onečišćavala**) ulazi u atmosferu iz prizemnih izvora.

Plinoviti primarni polutanti predstavljaju 90% svih emisija u atmosferu. Iz te skupine izdvajamo najznačajnije: sumporni dioksid ( $SO_2$ ), sumporni trioksid ( $SO_3$ ), ugljični monoksid ( $CO$ ), dušikove spojeve: dušični monoksid ( $NO$ ), dušični dioksid ( $NO_2$ ), amonijak ( $NH_3$ ); organske spojeve: ugljikohidrate ( $HC$ ), lebdeće organske spojeve (*VOC* ili *ROG* ili *TOG*), halogene spojeve ( $HF$ ,  $HCl$ ).

Sekundarni plinoviti onečišćivači nastaju termičkim, kemijskim i fotokemijskim reakcijama. Emisije primarnih polutanata u atmosferu direktno utječu na nastanak sekundarnih te time uvećavaju razinu onečišćenja nad širim područjem oko njihovih izvora. U tu skupinu možda je najznačajnije izdvojiti ozon ( $O_3$ ) i vodikove i dušične radikale ( $OH$ ,  $HCHO$ ,  $HNO_3^-$  itd.) kao vrlo reaktivne spojeve čiji ciklusi i reakcije dovode do niza drugih onečišćivača zraka.

Istraživanje onečišćenja zraka ima zadatak uvidjeti procese zbog kojih je došlo do onečišćenja te postaviti određene kontrolne mehanizme u svrhu smanjenja onečišćenja. Kako bi u samom početku do onečišćenja došlo, potrebno je emitirati određeni onečišćivač u atmosferu. S obzirom na izvor, onečišćivači mogu biti uzrokovani ljudskim (antropogenim) ili prirodnim (biogenim, geogenim) utjecajima. Iako su kontrolni mehanizmi isključivo orijentirani na ljudski uzrokovano onečišćenje, važno je naglasiti da biogeni izvori itekako mogu narušiti kakvoću zraka, a u nekim slučajevima izazvati značajne probleme onečišćenja zraka. Primjeri takvog zagađenja su vezani uz katastrofe izazvane vulkanskim paraklastičnim oblacima dima i sumporne maglice (erupcije vulkana Tambora, Krakatao, Mt. St. Helens, Mt. Pinatubo), kao i katastrofe uzrokovane velikim požarima zabilježenim širom svijeta. Uz vulkane i požare prirodni uzroci zagađenju zraka mogu biti iz raznih izvora: mineralna erozija vjetrom, erozija tla, životinjski i biljni otpadci, peludi, spore, emisije plinovitih spojeva iz tla, vegetacije i vodenih površina (halapljivi ugljikovodici -  $HC$ ), emisije uzrokovane električnim pražnjenjem ( $O_3$ ,  $NO_x$ ), stratosferskim prodiranjem u niže slojeve atmosfere ( $O_3$ ), fotokemijskim reakcijama, itd. Bez obzira što je količina emisija iz prirodnih izvora mnogo veća nego emisije iz antropogenih izvora, njihov je značaj neusporedivo manji, a utjecaj neperiodičan te kratkoga vijeka. Iznimku predstavljaju emisije iz biogenih izvora, tj. fotokemijski aktivni ugljikovodici poput terpena ( $BVOC$ ) koji igraju značajnu ulogu u procesima fotokemijske oksidacije u urbanim i ruralnim područjima, odnosno kod produkcije ozona.

Klasifikaciju antropogenih izvora onečišćenja definiraju zakonski propisi svih zemalja svijeta kako bi se uskladili i usporedili podaci o onečišćivačima i njihovim izvorima te u konačnici mogle ostvariti kontrolne mjere, kontinuirana praćenja onečišćenja, izrade statističkih publikacija i izvještaja. Tako je agencija za zaštitu okoliša SAD-a (EPA) sastavila SCC (*Standard Classification Codes*) klasifikacijsku nomenklaturu podijelivši izvore u grupe i podgrupe. U Hrvatskoj je prihvaćena klasifikacija Europske agencije za zaštitu okoliša (EEA-e) prema SNAP-97 nomenklaturi sa 11 sektora i njihovih podsektora.

Pored službenih klasifikacija izdvajamo niz često korištenih podjela:

- na mobilne (automobili, vlakovi, zrakoplovi, brodovi, itd.) i stacionarne izvore;
- izvori koji uključuju procese izgaranja i one koji ne uključuju izgaranje;
- točkasti (stacionarni: industrijski dimnjaci, itd.), linijski i površinski (skup mobilnih i stacionarnih izvora: cestovni transport, aerodromi, vlakovi, otvorena ložišta (požari), volumni izvori onečišćenja);
- direktni ili indirektni izvori

Svi izvori koji ne emitiraju onečišćenje (shopping centri, sportski stadioni), ali utječu na povećane razine onečišćenja njihovim privlačenjem (povećani promet motornih vozila) čine indirektne izvore.

### 1.1.2 Troposferski fotokemijski procesi

Troposfera je najniži sloj atmosfere koji je u neposrednom dodiru sa zemljom i koji na 10-16 km visine prelazi u sljedeći atmosferski sloj - stratosferu. Troposfera je vrlo dinamičan i,

sa stanovišta koncentracija plinova i čestica, izrazito varijabilan sloj atmosfere. Uzroci tome mogu se pronaći u složenoj konfiguraciji tla, izrazito turbulentnoj dinamici i činjenici da se upravo u njega emitiraju sva prizemna onečišćenja. Stratosferu, koja se prostire od 15-50 km, karakteriziraju geostrofički vjetrovi strogo horizontalnog karaktera, stratosfersko - troposferska izmjena tvari te izraziti porast temperature s maksimumom između 30 ili 50 km, a koja nastaje ozonskom apsorpcijom štetnih UV radijacija (240-290 nm). S koncentracijama od 2000 do 24000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  stratosferski, zdravi ozon predstavlja 90% ukupnog atmosferskog ozona. Putem stratosfersko - troposferske izmjene tvari (procesima vertikalne subdukcije nastale razlikama između stratosferskog i troposferskog zraka ili horizontalnim transportom) stratosfera doprinosi razini troposferskog lošeg ozona s visokim udjelom od 20-40%. Međutim, većina troposferskog ozona nastaje u prizemnom, graničnom sloju troposfere.

S obzirom na vrstu procesa koji se odvijaju u nižim i srednjim slojevima troposfere razlikujemo kemijske procese plinovitih faza, kemijske procese tekućih faza te kemijske procese mješovitih (tekućih i krutih) faza.

Kemijski procesi plinovitih faza uključuju oksidaciju organskih molekula uz prisutnost dušikovih oksida i sunčevog zračenja. Do oksidacije dolazi kroz niz raznih reakcija s radikalima, koji mogu biti izrazito kompleksni u slučaju da nastaju iz organskih spojeva. Osim metana ( $\text{CH}_4$ ), kao najprisutnijeg ugljikohidrata u atmosferi i jednog od stakleničnih plinova, postoji još niz drugih ugljikohidrata i organskih spojeva, bilo antropogenog ili biogenog postanka. Fotokemijski ozon nastaje upravo reakcijama dušikovih oksida ( $\text{NO}_x$ ) i spomenutih nemetanskih organskih plinova te predstavlja glavni proizvod troposferskih fotokemijskih procesa.

Kemijski procesi heterogenih i tekućih faza uključuju reakcije aerosolnih i vodenih čestica koji mogu utjecati na razinu ozona putem produkcije ili redukcije hidroksilnih radikala ili dušičnih oksida.

### 1.1.2.1 Fotodisocijacija

Mnoge kemijske reakcije u atmosferi započinju fotodisocijacijom plinovitih tvari. Primjeri nekih od važnih troposferskih plinovitih spojeva koji disociraju pod utjecajem sunčevog zračenja su  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{HCHO}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ,  $\text{HONO}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Kako bi se točno predvidjeli i modelirali efekti onečišćenja zraka, potrebno je na samom početku utvrditi reaktivnu mjeru fotodisocijacije. Fotodisocijacija je proces kod kojeg molekula, pri određenim valnim duljinama, apsorbira fotone i time prelazi u viši energetski nivo pri čemu može doći do disocijacije pojedinih atoma ili molekula odnosno nastanka radikala. Sam proces pretvorbe sunčeve u kemijsku energiju ovisi o količini dozračenog sunčevog fluksa, tzv. *aktinični fluks*, sposobnosti molekule da apsorbira fotone, kvantnoj korisnosti molekule te gustoći molekule u atmosferi. Mjera fotodisocijativnosti  $J_i$  ( $\text{min}^{-1}$ ) izražava se kao

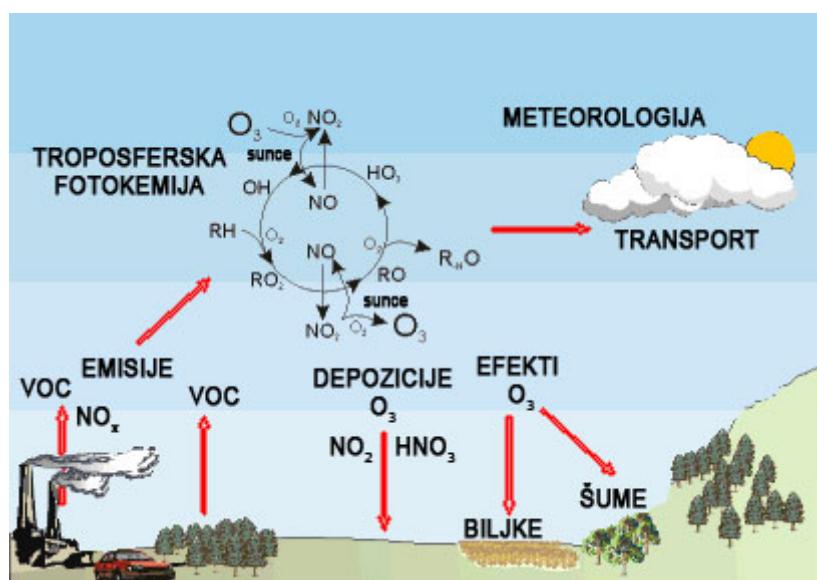
$$J_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sigma_i(\lambda) \phi_i(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

gdje je,  $F(\lambda)$  fluks sunčevog zračenja (broj fotona  $\text{cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ ),  $\sigma_i(\lambda)$  apsorpcijski poprečni presjek za i-tu reakciju ( $\text{cm}^2 \text{ molekula}^{-1}$ ),  $\phi_i(\lambda)$  kvantna korisnost molekule i kemijske reakcije (molekula  $\text{foton}^{-1}$ ) i  $\lambda$  valna duljina (nm). Apsorpcijski poprečni presjek predstavlja mjeru sposobnosti molekule da apsorbira fotone, dok je kvantna korisnost vjerojatnost nastanka određenih produkata kemijske reakcije procesima fotodisocijacije. Ove su vrijednosti laboratorijskim mjeranjima određene za većinu troposferskih fotodisocijativnih molekula, a funkcija su valnih duljina te mogu biti i funkcije tlaka i temperature. Aktinični fluks je radiometrijska mjera sunčevog zračenja ovisna o astronomskom i geometrijskom

odnosu Zemlje i Sunca (doba dana i godine, geografska širina i dužina, visina), ekstraterestričkoj radijaciji, zemljinom albedu te postotku atmosferskih apsorbera ( $O_3$ ,  $O$ ), raspršivača (aerosoli) i naoblake u troposferi.

### 1.1.2.2 Osnovni kemijski procesi plinovitih spojeva

Produkti koji nastaju procesima fotodisocijacije u troposferi izrazito su reaktivni te omogućuju razvoj i nastanak kemijskih reakcija koje dovode do nastanka sekundarnih onečišćivača atmosfere. S obzirom da je ozon glavni proizvod troposferskih kemijskih procesa probliže ćemo promotriti procese koji dovode do njegovog nastanka.



Sl. 1.3 Procesi koji utječu na razinu troposferskog onečišćenja

Pri ultraljubičastom zračenju valnih duljina manjih od 424 nm dolazi do fotolize  $NO_2$ . Dobiveni atom kisika reagira trenutačno s molekulom kisika pri čemu nastaje ozon  $O_3$ .



Novonastali ozon ima kratki vijek trajanja jer trenutačno reagira s  $NO$  prema jednadžbi (1.4). Ovaj ciklus kemijskih reakcija (1.2) - (1.4), kod kojih ozon nastaje i nestaje, naziva se *titracija*.

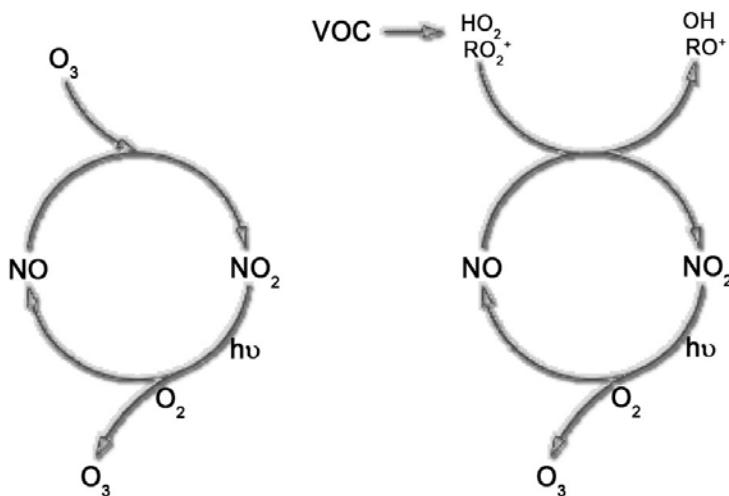


Odnos učestalosti odvijanja reakcija titracije ozona pokazatelj je stacionarnosti titracije i konstantne pozadinske koncentracije ozona u troposferskom sloju atmosfere od 25 do 45 ppb:

$$[O_3] = \frac{J[NO_2]}{k[NO]} \quad (1.5)$$

gdje je  $J$  mjeru fotodisocijacije  $NO_2$ , a  $k$  učestalost reakcije (1.4).

Do većih akumulacija ozona ne može doći samim procesom titracije, već drugim kemijskim reakcijama koje konzumiraju  $NO$  te time smanjuju učestalost raspada ozona.



**Sl. 1.4 Shematski prikaz reakcija uključenih u pretvorbu  $NO$  u  $NO_2$  i nastanak  $O_3$  bez prisustva  $VOC$ -a (lijevo) i uz prisustvo  $VOC$ -a (desno)**

Reakcijom kojom  $OH$  radikal napada ugljikohidrate, poput lebdećih organskih spojeva ( $VOC$ ), nastaju peroksidi  $RO_2$  koji konzumiraju  $NO$  prema (1.7) i onemogućuju titraciju ozona. Što je veća koncentracija  $VOC$  i  $NO$  plinova u atmosferi to je veća učestalost oksidacije  $NO$  u  $NO_2$  što dovodi do povećanih koncentracija  $NO_2$  u atmosferi čime je prema (1.2) i (1.3) veća učestalost nastanka ozona.



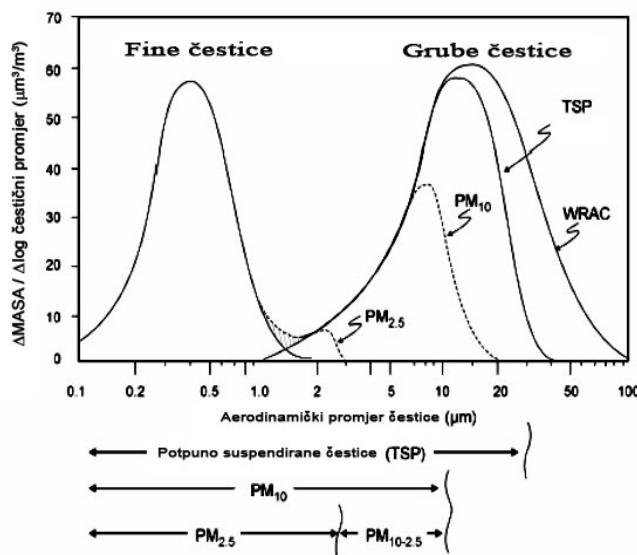
Ovo je pojednostavljeni prikaz i samo dio mnogo složenijih kemijskih reakcija pri kojima nastaju vodikovi i peroksidni radikali odgovorni za nastanak ozona. Ostali su najznačajniji predstavnici organskih plinovitih spojeva, koji utječu na akumulaciju  $NO_2$ , a čine sastavni dio složene troposferske kemije, antropogeni spojevi alkani, alkeni, aromatski ugljikovodici, aldehydi, ketoni i biogeni spojevi terpeni.

### 1.1.2.3 Osnovni heterogeni kemijski procesi

Heterogeni kemijski procesi su svi kemijski procesi koji uključuju aerosole (tekuće i krute čestice) u atmosferi. Kondenzirana voda je najčešći oblik suspenzije u troposferi od kojih je pojava oblaka najučestaliji oblik. S obzirom na tu činjenicu većina heterogenih kemijskih procesa opisuje formaciju oblaka i sličnih pojava. Osim vode i vodene pare postoji niz drugih tekućih i krutih čestica koje nastaju antropogenom emisijom primarnih finih čestica (direktno iz prizemnih izvora) i atmosferskim kemijskim reakcijama plinovitih spojeva pri čemu nastaju sekundarne čestice. Za razliku od ozona, čestice ne promatramo kao jedinke već je učestalo koristiti termin *čestična materija PM* (eng. *particulate matter*) kojom se opisuje mješavina čestica različitih veličina, oblika, sastava te kemijskih, fizikalnih i termodinamičkih osobina.

Pod izrazom  $PM$  uključujemo sulfate, nitrate, amonijak, vodikove ione, suspenzije finih čestica u vodi, elementarni ugljik, niz organskih spojeva te mineralnu prašinu.

Veličine čestica se kreću od 10 nm (molekularne nakupine) do 70  $\mu\text{m}$  (veličina ljudske vlas). Malene čestice su brojnije s maksimumom ispod 0.1  $\mu\text{m}$ , dok većih čestica (0.1 - 10  $\mu\text{m}$ ) ima manje, ali predstavljaju većinu čestične mase u troposferi. Čestice dijelimo s obzirom na aerodinamički promjer čestice: *ultrafine* čestice u rasponu do 0.1  $\mu\text{m}$ , *fine* čestice između 0.1 i 1  $\mu\text{m}$  te *grube* čestice promjera većeg od 1  $\mu\text{m}$ . Ultrafine i fine čestice imaju najduže rezidentno vrijeme u atmosferi zbog nemogućnosti da se relativno brzo istalože ili zgrušaju u skupine. Finije čestice raspršuju mnogo puta veću količinu sunčeve svjetlosti nego grublje čestice i time utječu na smanjenje vidljivosti u zraku. Bez obzira na ovu teorijsku podjelu čestica, praćenje količine čestica u atmosferi obilježeno je nizom veličina koje su se određivale s obzirom na saznanja o utjecaju čestica na ljudsko zdravlje. U početku se mjerila isključivo ukupna količina suspendiranih čestica *TSP* (eng. *Total Suspended Particles*) veličine do 100  $\mu\text{m}$ . S vremenom je postalo jasno da su čestice manjih promjera od većeg značaja za onečišćenje okoliša i ljudsko zdravlje. Prema tome definirane su veličine  $PM_{10}$ , za čestice do 10  $\mu\text{m}$ , i  $PM_{2.5}$  za fine čestice do 2.5  $\mu\text{m}$ .



Sl. 1.5 Idealizirana distribucija atmosferskih finih i grubih čestica te frakcija prikupljenih filterima različite propusnosti.

Većina sekundarnih čestica su fine čestice  $PM2.5$ , a nastaju najčešće kondenzacijom sulfatnih, dušičnih i organskih parovitih produkata atmosferskih kemijskih procesa. Njihov nastanak ovisi o koncentraciji njihovih prekursora i ostalih plinovitih reaktivnih spojeva poput ozona, hidroksilnih i peroksilnih radikala. Nastanak  $PM2.5$  ovisi i o atmosferskim uvjetima uključujući intenzitet sunčevog zračenja i relativnu vlažnost te o interakciji prekurzora i postojećih čestica s oblacima ili maglom.

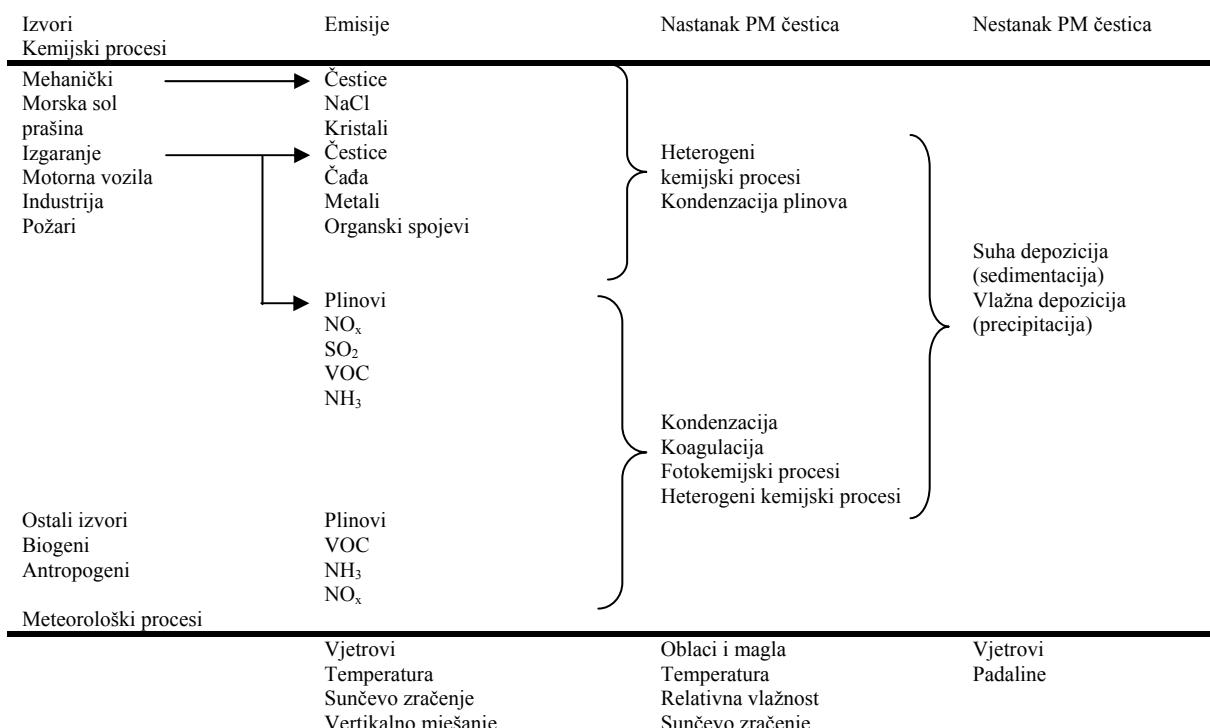
Objasnimo mehanizme kojima nastaju neki od njih.

**PM sulfati** su isključivo sekundarne čestice, a predstavljaju polovicu ukupne atmosferske koncentracije  $PM2.5$ . Većina sulfata iz  $PM2.5$  nastaje tijekom dana u oblacima. Zrakom nošen  $SO_2$  prodire u oblake, veže se na oblačne vodene kapljice i konačno oksidira stvarajući pri tome sulfatne čestice. Na koncentraciju sulfata u atmosferi značajno utječu fotokemijske oksidacije  $NO_x$  i  $VOC$ -a te ljetno razdoblje koje pospješuje oksidativne procese u oblacima.

**PM nitrati**, kao i sulfati, nastaju u potpunosti u atmosferi reakcijama s dušičnim dioksidom  $NO_2$ . Mogu nastati i tijekom dana i tijekom noći. Tijekom dana  $NO_2$  oksidira uz

prisustvo hidroksilnih radikala, a tijekom noći s ozonom i dušičnim radikalima pri čemu u oba slučaja nastaje dušična kiselina  $\text{HNO}_3$ . Reakcijom dušične kiseline i amonijaka nastaje čestični ammonium-nitrat.

**Ugljične PM čestice** i čestice elementarnog ugljika su uglavnom sekundarne čestice nastale u atmosferi utjecajem emisija primarnih plinova iz biogenih i antropogenih izvora. Kemijske reakcije u kojima sudjeluju lebdeći organski spojevi *VOC* stvaraju organske spojeve sa svojstvom brzog kondenziranja pri niskom tlaku pare. Oksidacijom *VOC* također nastaju radikali koji nukleacijom dovode do nastanka novih čestica.



Sl. 1.6 Izvori plinova prekursora i primarnih čestica te mehanizmi nastanka i odstranjivanja PM čestica iz atmosfere. Najvažnije meteorološke značajke prikazane su za pojedini proces.

Prema iznijetim primjerima mehanizama, pri kojima nastaju PM čestice, vidljivo je da je utjecaj fotokemijskih reakcija od primarnog značaja za njihov nastanak. Njihov gubitak ili nestanak direktno je pod utjecajem meteoroloških prilika u troposferi.

### 1.1.3 Utjecaj meteoroloških uvjeta na kakvoću zraka

Vremenski uvjeti imaju snažan utjecaj na koncentraciju atmosferskog onečišćenja. Još otkako je čovjek izumio vatru koristio je atmosferu kao sredstvo za odvođenje dima. Atmosfera, s obzirom na svoj volumen i dinamiku, tolerira određenu količinu povećanog onečišćenja te ih procesima disperzije postepeno razrjeđuje do razine pozadinskih atmosferskih koncentracija. Kao i svaki deponij otpada, i atmosfera ima svoja ograničenja. Slaba disperzija polutanata, rezultirana nizom meteoroloških fenomena, omogućuje nakupljanje većih količina onečišćenja koji mogu degradirati kvalitetu okoliša i zaprijetiti ljudskom zdravlju. Stoga je kritično za izradu točnih prognoza kakvoće zraka poznavanje vremenskih utjecaja na koncentraciju atmosferskih polutanata. Kvaliteta zraka ovisna je o vremenskim fenomenima na različitim prostornim skalamama (Sl. 1.7) od velikih anticiklonalnih polja, koje se prostiru na tisuće kilometara, do lokalnih turbulentnih strujanja oko gradskih zgrada.

Prostorna skala	Veličina područja (km)	Vremenski period	Meteorološki fenomeni
MAKROSKALA	> 200	tjedni-mjesečni	atmosferska cirkulacija vremenske fronte
MEZO-alfa (sinoptička, regionalna)	20 - 200	satni – dnevni	polja visokog i niskog tlaka kopneni i morski povjetarci
MEZO-beta (regionalna)	2 - 20	satni	urbani toplinski otoci vjetrovi u dolinama cikloni
MEZO-gama (regionalna, lokalna)	< 2	minutni - satni	ponašanje perjanice dima optjecanje i vrtloženje oko zgrada turbulentna strujanja
MIKROSKALA (lokalna, urbana)			

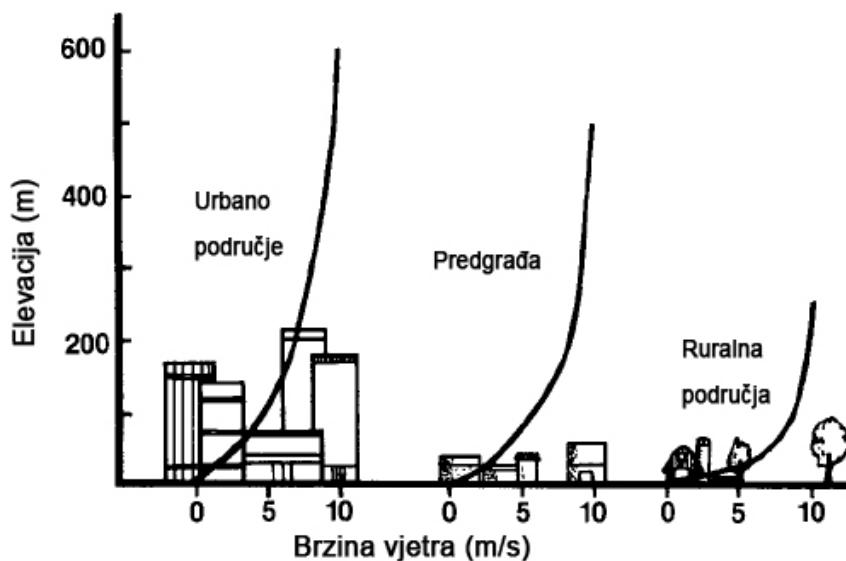
Sl. 1.7 Meteorološke prostorne skale

Antropogeni i biogeni izvori onečišćenja uglavnom se nalaze u niskom sloju uz zemljinu površinu. Pri samom izvoru onečišćenja emitirani plinovi i čestice posjeduju vrlo visoke koncentracije te time izravno utječu na degradaciju kvalitete okoliša uz sami izvor. Osim difuzije, koja relativno brzo raspršuje onečišćenje u neposrednu okolicu izvora, disperzija je proces koji je uvelike prisutan u niskim slojevima troposfere pod utjecajem mikroskalnih i mezoskalnih meteoroloških fenomena i topografije terena. Makroskalna kretanja zraka također uzrokuju disperziju onih polutanata koji imaju duže rezidentno vrijeme u troposferi kao npr. ugljični dioksid ( $CO_2$ ) i halogeni spojevi ( $CFC$ ). S obzirom da pojave na različitim skalamama na različite načine utječu na transport atmosferskog onečišćenja potrebno ih je promatrati odvojeno. Iz toga slijedi logičan princip da se najprije utvrde vremenski uvjeti na većoj regionalnoj i/ili sinoptičkoj skali i njihov utjecaj na lokalne pojave, a tek tada pojave na lokalnoj razini i njihov utjecaj na kakvoću zraka. Među najvažnijim meteorološkim utjecajima na regionalnu i lokalnu kakvoću zraka su: horizontalne advekcije vjetrom, dnevne recirkulacije pod utjecajem lokalnih polja tlaka, sezonske i dnevne varijacije sunčevog zračenja, vertikalno miješanje unutar atmosferskog graničnog sloja, promjena temperature i vlage zraka.

### 1.1.3.1 Transport i disperzija vjetrom

Horizontalni vjetrovi imaju značajnu ulogu u transportu i razrijedenju onečišćenja zraka. Porastom brzine vjetra koji puše uz izvor onečišćenja disperzija je jača, a koncentracija polutanata sve manja. Što je manja koncentracija osnovnih primarnih prekursora za nastanak ozona i time je smanjen broj kemijskih reakcija koje dovode do njihovog nastanka i prema tome bolja kvaliteta zraka. Snažni vjetrovi ipak mogu narušiti kvalitetu podizanjem prašine s kopna i time povećavajući koncentraciju  $PM_{2.5}$  u troposferi. Brzina horizontalnog vjetra ovisi o trenju, tj. hrapavosti zemljine površine, kojeg stvaraju topografski i urbani objekti poput planina, dolina, rijeka, jezera, obrađenih površina i gradskih zgrada. Što je podloga *grublja*, time je brzina vjetra manja, ali turbulentnost strujanja veća što pogoduje disperziji onečišćenja. Veće brzine vjetra nalazimo nad obradivim zemljanim površinama, jezerima, uvalama gdje pušu ravnomjerno te mogu prolaskom uz izvor onečišćenja utjecati na povećane nizstrujne koncentracije onečišćenja te njenu bržu depoziciju. Slika prikazuje odnos vertikalnog profila brzine u odnosu na vrstu površine kojom struji vjetar. Može se zaključiti da vjetrovi pušu slabijim intenzitetom to više što se više približavamo urbanim *hrapavijim* područjima. Ako promatramo određeno područje te kako na njega djeluju lokalni vjetrovi, moguće je utvrditi obrazac po kojem vjetar pri određenim uvjetima uvijek slijedi isti smjer kretanja. Na taj način se mogu utvrditi mrtve zone, odnosno topografski specifičnih područja,

prema kojima vjetrovi nikada ili jako rijetko pušu. Prema tome može se zaključiti da smjer i intenzitet vjetra podjednako mogu utjecati na razinu kvalitete zraka nad određenim područjem.

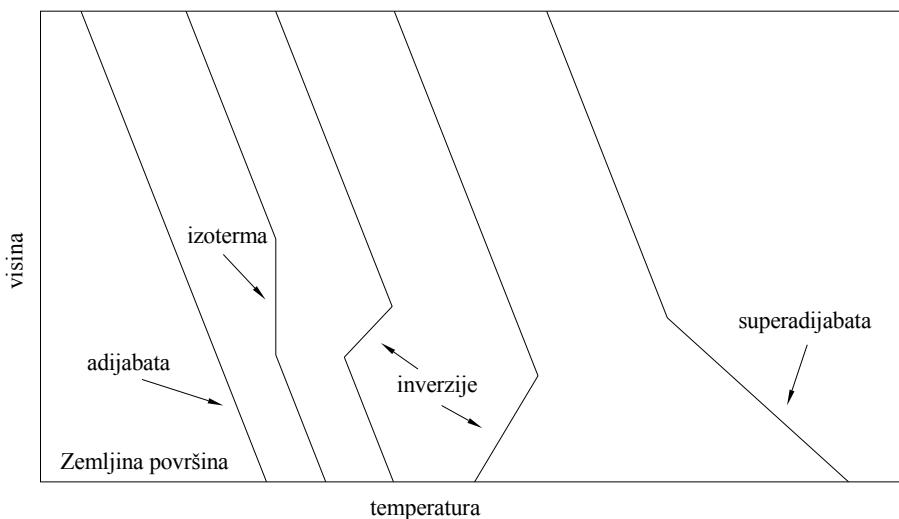


Sl. 1.8 Vertikalni profili brzina vjetra s obzirom na tipove hrapavosti površine

### 1.1.3.2 Atmosferska stabilnost

Jedan od najbitnijih pokazatelja koji karakteriziraju stanje atmosfere je promjena temperature i tlaka po visini. Temperaturni profili atmosfere su uvjetovani mnogim utjecajima kao što su grijanje i hlađenje zemljine površine, kretanje zračnih masa, postojanje oblaka i topografskih prepreka. Budući da je zrak slab vodič topline, *adijabatska* promjena (ekspanzija idealnog plina bez izmjene topline s okolinom) temperature s visinom predstavlja ***neutralno stanje atmosfere***. Adijabatsku promjenu stanja karakterizira linearna promjena temperature po visini. U prosjeku se temperatura suhog zraka smanjuje otprilike 1K za svakih 100 m visine. U stvarnosti vertikalni profil atmosfere često odstupa od adijabatskog (Sl. 1.9). Slučaj kada je temperaturni pad s visinom brži od adijabatskog nazivamo *superadijabatski*. Takvo stanje atmosfere okarakterizirano je ***nestabilnim stanjem atmosfere***. Ako je, pak, temperaturni pad sporiji (po visini) od adijabatskog imamo ***stabilno stanje***. Stabilno stanje karakteriziraju dva specijalna slučaja: *izoterma* kod koje je temperatura po visini konstantna te *inverzija* kod koje temperatura raste s visinom. Primjeri ovih slučajeva mogu se potražiti u atmosferskim procesima. Zemlja danju prima energiju od Sunca i grije se, obratno, noću se hladi i zrači energiju u atmosferu.

Superadijabatsko stanje može nastati unutar nekoliko stotina metara visine u vedrom danu s laganim vjetrom kada vruća zemljina površina zagrijava atmosferu čija je temperatura mnogo niža. Što je veća razlika između temperature površine i atmosferskog zraka, tim je konvektivni proces vertikalnog miješanja veći. Proces *konvekcije* je dnevni proces kod kojeg Sunce zagrijava površinu koja grijije zrak u njenoj neposrednoj blizini. Taj zrak ekspandira, postaje lakši i uspinje se uz vertikalne konvektivne kolone zraka. Što je veća površina vertikalne kolone zraka koji se uspinje, tim je proces disperzije onečišćenja veći. Zagrijavanje zemljine površine povećava i evaporaciju biogenih organskih spojeva i isparavanje vodenih površina pri čemu se povećava ukupna količina emisija koja vertikalnim miješanjem odlazi u više slojeve troposfere.



Sl. 1.9 Karakteristične raspodjele temperature atmosfere u funkciji visine

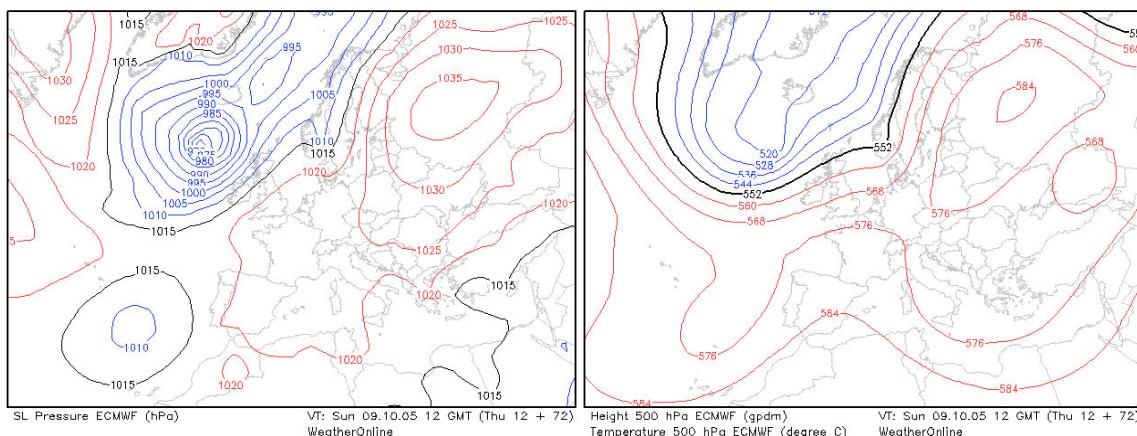
Uz pojam vertikalnog miješanja veže se *maksimalna visina miješanja* (Sl. 1.11) kao vrijednost ovisna o temperaturi površine. To je dubina konvektivnog sloja do kojega se zrak uspeo prije nego se ohladio dovoljno da postane gušći od okolnog zraka i ponovno padne na površinu i započne novi ciklus uspinjanja i silaženja.

Suprotno toj je situacija kada u vedroj noći zbog isijavanja energije nastane naglo hlađenje zemljine površine do temperature niže od temperature zraka iznad površine zemlje. Tim procesom nastaje *temperaturna inverzija*. Temperaturne inverzije onemogućuju vertikalno miješanje zraka i time povećavaju koncentracije ozonskih i čestičnih prekurzora. Što je koncentracija prekurzora u atmosferi veća, time su kemijske reakcije brže i efikasnije u proizvodnji sekundarnih polutanata atmosfere.

Postoji nekoliko vrsta inverzija na raznim visinama troposfere. Najčešći oblik temperaturne inverzije je inverzija koja nastaje od 25 do 300 m n.m. kada se tijekom noći površina brže hlađi nego zrak nad njom. Ovaj tip inverzije se naziva *noćna inverzija*. Najjače inverzije nastaju za čistih noćnih večeri i dugih zimskih noći. Ovakav oblik inverzije omogućuje zadržavanje tijekom noći emitiranog onečišćenja zraka u prizemnom sloju. Tijekom dana sunce zagrijava površinu koja postepeno započinje proces vertilanog miješanja, uništava noćnu inverziju do podneva i omogućuje vertikalnu disperziju nakupljenog onečišćenja. Ako je proces sunčevog zračenja spor (prisutnost naoblake, i sl.) ili je inverzija jaka, tada ona može opstati i duže onemogućavajući vertikalno miješanje onečišćenja i time stvarajući velike koncentracije onečišćenja.

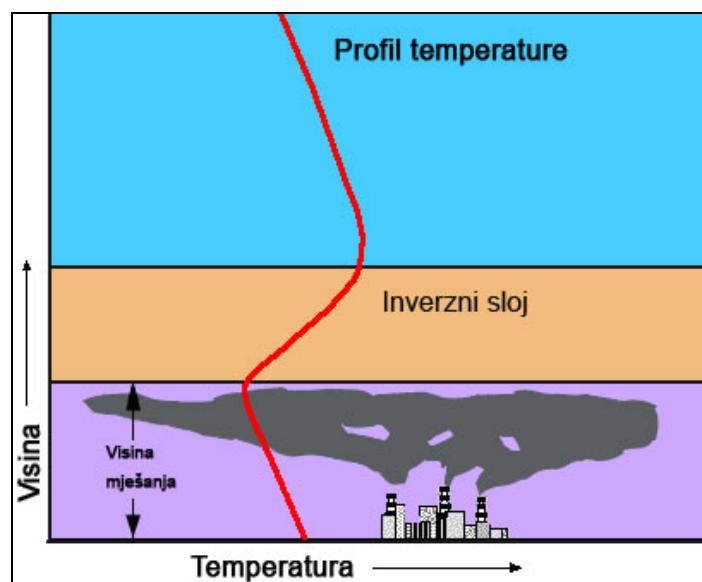
### 1.1.3.3 Grebeni visokog i doline niskog tlaka

Izobarne plohe 500, 700 i 850 hPa najčešći su meteorološki pokazatelji povišenih tlačnih sustava. Njihova apsolutna topografija odlikuje se područjima viših i nižih geopotencijala (udaljenosti točke na plohi od zemljine površine). Područja viših i nižih geopotencijala mogu biti izdužena te tada govorimo o grebenu visokog i dolini niskog tlaka odnosno područjima toplijeg zraka i područjima hladnog zraka.



**Sl. 1.10 Konturni prikaz površinskog tlaka (lijevo) i visinska karta 500 hPa izobarne plohe na dan 09.10.2005. god. 12:00 GMT (izvor: ECMWF)**

Polja visokog tlaka ili anticiklonsko polje najčešće donose stabilno vrijeme sa slabim vjetrovima omogućavajući akumulacije onečišćenja nad većim područjima. Pod utjecajem grebena visokog tlaka kolona zraka započinje propadati prema površini zemlje pri čemu se zrak komprimira te zagrijava. Na taj način nastaju *anticiklonske inverzije* ili *inverzije sruštanja*. Moguće ih je pronaći na visinama od 500 do 2000 m n.m. Ako je inverzija sruštanja dovoljno jaka da ju dnevno zagrijavanje površine ne može uništiti, tada je vertikalno miješanje zraka jako slabo pod njom, te takvi uvjeti pogoduju akumulaciji ozona i PM<sub>2.5</sub>.



**Sl. 1.11 Anticiklonska temperaturna inverzija i visina miješanja**

Polja niskog tlaka ili ciklonalna polja su najčešće stanja atmosfere pri kojima dolazi do snažnih konvekcija rezultirajući dobrom disperzijom onečišćenja.

#### 1.1.3.4 Oblaci, magle i padaline

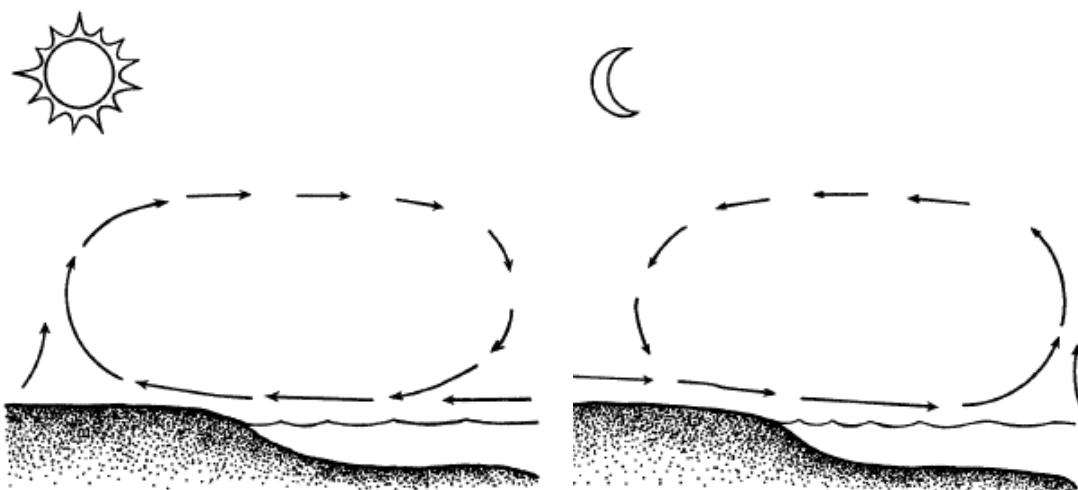
Oblaci nastaju kada se zrak bogat vodenom parom hlađi i pri tom voda kondenzira. Do hlađenja zraka dolazi podizanje zraka uslijed niskog polja tlaka, na granicama fronti, strujanjem zraka preko planina ili konvektivnom nestabilnošću. Oblaci su bitni za razinu kvalitete zraka zbog toga što smanjuju količinu dozračenog sunčevog zračenja potrebnog za

fotooksidativne procese pri kojima nastaju ozon i ostali onečišćivači zraka. Magla nastaje hlađenjem vlažnog zraka koji je u dodiru sa zemljinom površinom. Oblaci i magle pogoduju pretvorbi sumpornih i dušičnih oksida u aerosoli (sekundarni  $PM_{2.5}$ ).

### 1.1.3.5 Topografski utjecaji

Topografija uzrokuje mikro i mezoskalna strujanja zraka u blizini izvora onečišćenja. Većina industrijskih postrojenja situirana su uz morsku obalu, doline rijeka ili na obalama jezera u svrhu iskorištavanja vodenih resursa u pogonima. Ali nasuprot tome, lokalna strujanja zraka nad tim područjima mogu utjecati na disperziju onečišćenja.

**Obalna cirkulacija** je specifični mezoskalni meteorološki fenomen koji je uzrokovan razlikom između hlađenja i grijanja vodene i kopnene površine u dodiru, a naročito se pojavljuje za čistih dana i noći (Slika 1.12). Tijekom dana, za vrijeme stabilne atmosfere i slabih dominantnih vjetrova, kopno se grije brže nego voda. Topli zrak nad kopnom se podiže i pomiciće prema vodenoj površini. Istovremeno, zbog razlike u temperaturi i tlaku, zrak nad morem se pomiciće ka kopnu kako bi nadomjestio netom podignuti topliji zrak. Podignuti zrak s kopna nad vodom se hlađi i silazi zatvarajući slabu cirkulaciju. Na taj način nastaje *smorac*. Tijekom noći kopno se brže hlađi i uzrokuje horizontalno strujanje prema vodenoj površini. Na taj način nastaje obrnuta cirkulacija, a takav vjetar naziva se *kopnenjak*. Zbog manje razlike u temperaturama, prilikom kojih nastaje kopnenjak, ovakav vjetar je mnogo slabiji od smorca. Obalna cirkulacija egzistira isključivo uz slabe dominantne vjetrove. U slučaju da dominiraju snažniji vjetrovi, obalna cirkulacija biva poništena.



Slika 1.12 Obalna cirkulacija zraka : smorac (lijevo) i kopnenjak (desno)

Za vrijeme proljetnih i ljetnih mjeseci obalna cirkulacija može zarobiti polutante u svoju struju te ih u više navrata vraćati na kopno čime može doći do opasnih kopnenih akumulacija onečišćenja.

**Orografske kanalizacije vjetrova** predstavljaju specifični fenomen koji nastaje u dolinama tijekom noći kada se sa planinskih obronaka koji su hladniji od zraka u dolini počinje spuštati hladniji zrak te stvarati *dolinski vjetar* koji puše nizstrujno riječnom toku dok ne ispuni dolinu hladnim zrakom. Takva terenska kanalizacija pojačava noćnu inverziju čime pogoršava razinu kvalitete zraka te istovremeno može služiti prijenosu sakupljenog onečišćenja niz dolinu. Jačina inverznog sloja ovisi o dubini doline i intenzitetu radijacijskog hlađenja doline i obronaka.

## 1.2 Zakonska podloga praćenju i procjeni onečišćenja zraka u Republici Hrvatskoj

Dinamičan razvoj hrvatskog zakonodavstva po pitanju zaštite zraka i okoliša usko je vezan uz Europske i svjetske konvencije čiji je potpisnik i sudionik Republika Hrvatska. Međunarodne obveze preuzete iz protokola tih konvencija su postepeno utjecali na formiranje novih zakona, uredbi i pravilnika unificiranih na svjetskoj razini i razini Europske zajednice. Većina obveza propisuje redovito izvješćivanje o stanju onečišćenja zraka i emisija u okoliš, a na temelju mjerena iz postaja za trajno praćenje onečišćavala zraka i emisija na ispustima važnijih industrijskih postrojenja. Važno je detaljnije objasniti ulogu pojedinih Konvencija u kreiranju hrvatskih zakona i njihov dalekosežni utjecaj na budućnost istraživanja onečišćenja zraka.

### 1.2.1 Konvencija o dalekosežnom prekograničnom onečišćenju zraka CLRTAP

Tehnološki razvoj i istraživanja na području onečišćenosti atmosfere omogućila su bolje razumijevanje o utjecajima onečišćujućih tvari na okoliš. Još tijekom 60-tih godina prošlog stoljeća znanstvenici su ukazali na povezanost emisija  $SO_2$  iz kontinentalne Europe i zakiseljavanja Skandinavskih jezera. Tijekom 70-tih nizom znanstvenih studija ponovili su se slični rezultati diljem Europe i svijeta, a Ujedinjeni narodi pozvali su na međunarodnu suradnju u borbi protiv zakiseljavanja. Sukladno tome je, u organizaciji Europskog gospodarskog povjerenstva Ujedinjenih naroda UNECE<sup>1</sup>, 1979. godine u Ženevi održana konvencija o dalekosežnom prekograničnom onečišćenju zraka CLRTAP<sup>2</sup> na kojoj je istaknuta potreba za suradnjom europskih zemalja na znanstvenom i političkom nivou kako bi se osmislice specifične mjere za smanjenje emisija zagađivača zraka.

**Tabela 1.1. Protokoli CLRTAP konvencije o dalekosežnom prekograničnom onečišćenju zraka**

Protokol CLRTAP Konvencije	Godina donošenja	Godina stupanja na snagu	Zakon o potvrđivanju protokola RH
Protokol o zajedničkom praćenju i procjeni dalekosežnog prekograničnog prijenosa onečišćujućih tvari u Europi (EMEP <sup>3</sup> )	1984.	1988.	1991.
Protokol o 30-postotnom smanjenju $SO_2$ i njihov prekogranični prijenos	1985.	1987.	NN 17/98.
Protokol o kontroli emisija dušičnih oksida i njihov prekogranični prijenos	1988.	1991.	-
Protokol o kontroli emisija hlapljivih organskih spojeva (VOC) i njihov prekogranični prijenos	1991.	1997.	-
Protokol o dalnjem smanjenju emisija sumpora	1994.	1998.	NN 17/98.
Protokoli o teškim metalima	1998.	2003.	1998.
Protokol o postojanim organskim onečišćavalcima (POP <sup>4</sup> )	1998.	2003.	1998.
Protokol o suzbijanju zakiseljavanja, eutrofikacije i prizemnog ozona (MPMEP <sup>5</sup> )	1999.	2005.	1999.

<sup>1</sup> UNECE – United Nations Economic Commission for Europe

<sup>2</sup> CLTRAP - Convention on Long Range Transboundary Air Pollution

<sup>3</sup> EMEP - Co-operative Program for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe

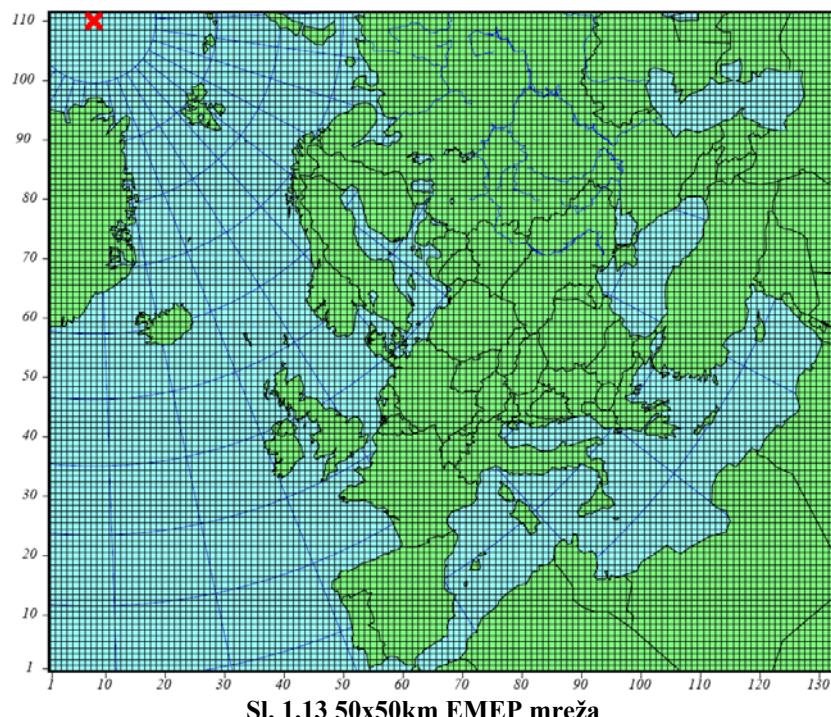
<sup>4</sup> POP – Persistent Organic Pollutants

<sup>5</sup> MPMEP - Multi-Pollutant, Multi-Effect Protocol

Bio je to prvi međunarodni instrument usklađivanja zakonodavstvenih mjera u području zaštite okoliša potpisani od strane 34 europske zemlje i Europske unije. Cilj je bio postavljen: svi moraju donijeti zakonske mjere o postupnom smanjenju onečišćenja zraka i eventualnoj zabrani onečišćavanja zraka uključujući i dalekosežni prekogranični transport onečišćujućih tvari. Konvencija je službeno zaživjela 1983. godine, a tijekom godina je nadopunjena sa osam protokola. Godine 1990. Hrvatska postaje potpisnica CLRTAP konvencije te preuzima obvezu, prema EMEP protokolu, izdavanja godišnjih izvješća o emisiji sljedećih štetnih tvari:  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , nematanskih hlapljivih organskih spojeva,  $CO$ ,  $NH_3$ , teških metala i stabilnih štetnih organskih tvari. Za ove štetne tvari svaka potpisnica konvencije dostavlja ukupnu nacionalnu emisiju, kao i emisiju razvrstanu u 11 grupa zagađivača kako to određuje SNAP<sup>6</sup> nomenkatura. Metodologija za procjenu emisije prema SNAP-ovim grupama zagađivača dana je u zajedničkom EMEP/CORINAIR priručniku za procjenu emisije štetnih plinova u atmosferu (*Atmospheric Emission Inventory Guidebook*).

### 1.2.1.1 EMEP program

U sklopu međunarodnih programa, za potrebe Konvencije, pripremaju se relevantne informacije o posljedicama onečišćenja u različitim sastavnicama okoliša, a na osnovi kompleksnog programa mjerena i rezultata modeliranja za područje cijele Europe (EMEP program, programi integralnog mjerena). Radna grupa, na osnovi rezultata mjerena i modeliranja koje se provodi EMEP programom, utvrđuje tzv. "kritično opterećenje" u točkama mreže 50x50 km Europe, na osnovi kojeg se priprema prijedlog za smanjenje emisija u pojedinim područjima. Smanjenje emisija nije proporcionalno za sve države, odnosno ovisi o potencijalu područja da podnese određeni stupanj kritičnog opterećenja. Rezultati i zaključci podnose se radnoj grupi za strategiju koja ih razmatra, te na osnovi njih predlaže donošenje odluka o potrebi ograničavanja emisije štetnih spojeva i priprema protokola o ograničavanju emisije.



<sup>6</sup> SNAP - Selected Nomenclature for Sources of Air Pollution

U okviru provođenja EMEP programa djeluju tri radna tima:

- emisije i projekcije emisije;
- monitoring i modeliranje;
- integralno modeliranje.

Poslove u okviru EMEP-a obavljaju četiri znanstvena instituta u suradnji s odgovarajućim institutima država stranaka Konvencije sa sljedećim zadacima:

- izrađivati i usavršavati metodologiju procjene emisije štetnih spojeva i nadzirati količine emisije onečišćenja svih država stranaka Konvencije;
- organizirati, voditi i usavršavati sustav monitoringa za praćenje taloženja onečišćujućih spojeva na području Europe koji uzrokuju: acidifikaciju, eutrofikaciju, fotokemijsko onečišćenje troposfere (ozon), onečišćenje teškim metalima, postojanim organskim onečišćavalima i krutim česticama;
- razvijati i primjenjivati modele daljinskog transporta za procjenu prijenosa štetnih tvari na području Europe;
- redovito svake godine izvještavati Upravni odbor EMEP-a i Konvenciju o stupnju onečišćenja u mreži 50x50 km izazvanu postojećim emisijama svake države, te o bilancama onečišćenja na području Europe, na osnovi kojih se utvrđuje udio svake države u onečišćenju ostalih područja Europe.
- razvijati i primjenjivati modele koji integriraju sve informacije u okolišu radi optimizacije emisije na području Europe i proračuna konkretnih obveza za smanjenje emisije svake države pojedinačno.

Rezultate EMEP programa koriste obje Radne grupe (za učinke na okoliš i za strategiju). Na osnovi rezultata modeliranja donose se prijedlozi novih protokola i nadopune postojećih, te pripremaju pravni mehanizmi za provođenje politike zaštite okoliša na području Europe.

### **1.2.1.2 Obveze prema ostalim protokolima CLRTAP konvencije**

Obveza je Hrvatske prema Protokolu o dalnjem smanjenju emisije  $SO_2$  zadržati emisiju  $SO_2$  ispod 117 kt do 2010. godine. MPME protokolom se istovremeno ograničava emisija  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NMVOC$  i  $NH_3$  (*multi-pollutant*), čime se utječe na zakiseljavanje, eutrofikaciju i prizemni ozon (*multi-effect*), a dane su i granične vrijednosti emisija za stacionarne i mobilne izvore. Cilj Protokola o teškim metalima je nadzirati antropogene emisije teških metala koje mogu imati nepovoljan utjecaj na zdravlje ljudi, odnosno okoliš (emisije olova, kadmija, žive i njihovih proizvoda). Protokol o postojanim organskim onečišćavalima ima za cilj nadzirati, smanjiti ili ukloniti ispuštanje emisija i gubitaka postojanih organskih onečišćava.

### **1.2.2 Europska agencija za okoliš EEA<sup>7</sup> i Europski referentni centar za onečišćenje zraka ETC/AE<sup>8</sup>**

Europska agencija za okoliš (EEA) je osnovana 1995. u Kopenhagenu (Danska), a potpuno je započela s radom 1996. godine. Osnovni ciljevi EEA su:

---

<sup>7</sup> EEA - European Environment Agency

<sup>8</sup> ETC/AE - European Topic Centre on Air Emissions

- Osnovati i koordinirati u suradnji sa zemljama članicama Europsku mrežu za praćenje stanja okoliša EIONET<sup>9</sup> (-), gdje bi zadatak EEA bio sakupljanje, analiziranje te daljnja obrada podataka i informacija.
- Osigurati pravovremene, relevantne i objektivne podatke osobama koje kreiraju politiku zemalja članica i građanstvu. Time bi se postigla značajna i mjerljiva poboljšanja u okolišu.
- Bilježiti i organizirati podatke o stanju okoliša, koje bi kroz stručne izvještaje dostavljale zemlje članice o kvaliteti, osjetljivosti i ugroženosti okoliša.

EEA je osnovala referentne centre kao znanstvenu podršku u različitim područjima onečišćenja okoliša. Jedan u nizu takvih centara je Europski referentni centar za onečišćenje zraka ETC/AE koji započinje s djelovanjem 1995. godine. Osnovna zadaća ETC/EAE je davanje znanstvene podrške i stručnih podataka vezanih za onečišćenje zraka Europskoj agenciji za okoliš. Institucije kojima EEA i ETC/EAE u najvećoj mjeri daju podatke su Europska komisija te Vlade članica EU, odnosno Vlade članica EEA. EEA daje i redovite izvještaje o stanju okoliša. Glavni cilj radnog programa ETC/AE je izdavanje godišnjih izvješća o inventaru emisija, tzv. CORINAIR. ETC/AE pruža potporu zemljama članicama pri izradi različitih izvješća u skladu s preuzetim međunarodnim obvezama, kako bi ta izvješća bila kompletna, transparentna, jezgrovita i donesena na vrijeme.

### 1.2.3 UNFCCC<sup>10</sup>/IPCC<sup>11</sup> i Kyoto protokol

Okvirna konvencija Ujedinjenih naroda o promjeni klime UNFCCC započela je s radom 1994. godine okupivši 189 zemalja svijeta. Konvencijom se naglašava potreba da se međudržavnim naporima te zakonskim odredbama uskladjuju nastojanja svih u borbi protiv najvećeg izazova današnjice, promjene klime. Predviđa se da će do kraja stoljeća emisije ugljikovog dioksida i ostalih stakleničkih plinova prouzročiti porast globalnog zatopljenja i to od 1,4 do 5,8 °C. Emisije stakleničkih plinova također će se odraziti i na vremenske prilike, izvore voda, izmjene godišnjih doba, ekosustav, te uzrokovati elementarne nepogode.

Promjenu klime konvencija tretira kao proces uzrokovani na globalnoj razini utjecajem industrijskih i drugih emisija ugljičnog dioksida i ostalih stakleničkih plinova u atmosferu. U okviru Konvencije potpisnice su dužne sakupljati informacije o emisijama stakleničkih plinova i dijeliti iskustva dobre prakse i zakonskih regulativa vezanih uz teme kojom se bavi Konvencija. Također, svaka zemlja je dužna izraditi strateške planove o emisijama stakleničkih plinova i njihovim utjecajima na okoliš te ih prosljeđivati Konvenciji koja propisuje mjere redukcije i kontrole za svaku pojedinu zemlju, a zemljama u razvoju pruža finansijsku i tehnološku pomoć. No, članice Konvencije su se suglasile u zaključku da su potrebne strože mjere kako bi se postigli nametnuti ciljevi.

Kyoto protokolom iz 1997. godine Konvencija je ojačala u svojim naporima da se postignu ciljevi smanjenja stakleničkih plinova. Protokolom se sve industrijski razvijene zemlje obvezuju smanjiti emisije šest glavnih stakleničkih plinova ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ , fluoriranih ugljikovodika, perfluoro spojeva i  $\text{SF}_6$ ) u periodu od 2008. do 2012. godine za 5% ispod razine vrijednosti iz bazne 1990. godine svake pojedine zemlje. Kako bi se pomoglo u redukciji, legalizirat će se sljedeći mehanizmi provedbe: međunarodna trgovina emisijama

<sup>9</sup> EIONET - European Environment Information and Observation Network

<sup>10</sup> UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

<sup>11</sup> IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

(*emissions trading*), potpuna provedba Mechanizma čistog razvoja, projekt zajedničkog ulaganja (*Join Implementation*), te potpora državama u razvoju u svladavanju negativnih učinaka klimatskih promjena. Kyoto protokol stupio je na snagu 16. veljače 2005. godine. Na 11. zasjedanju Konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime u Montrealu 09. prosinca 2005. godine donesena je odluka po kojoj će se, kako je predviđeno Konvencijom, Hrvatskoj dopustiti novi proračun godišnje razine emisija stakleničkih plinova koja je određena na temelju referentne 1990. godine. U odluci se kaže da se Hrvatskoj dopušta određeni stupanj fleksibilnosti prilikom određivanja referentne visine emisija stakleničkih plinova u odnosu na njenu povijesnu razinu. Odbor za provedbu odluka Konvencije će na svojoj sljedećoj sjednici razmotriti razinu emisija stakleničkih plinova u baznoj godini za Hrvatsku i predložiti njezino prihvaćanje na sljedećem zasjedanju stranaka Konvencije o zaštiti klime. To znači da će Hrvatska, kao potpisnica Kyoto protokola, prilikom obvezatnog smanjenja emisije stakleničkih plinova od 2008. godine iz svojih energetskih izvora, prometa i poljoprivrednih aktivnosti krenuti s više razine nego je to do sada bilo određeno uzimanjem 1990. godine kao osnovicu za izračun razine emisija. Četiri industrijski razvijene zemlje iz Aneksa I do sada nisu ratificirale Kyoto Protokol, a to su Australija, Lihtenštajn, Monako i Sjedinjene Američke Države.

#### 1.2.4 Hrvatski i europski zakoni, uredbe i pravilnici

Republika Hrvatska nije članica EEA, ali je potpisnica CLRTAP-a, UNFCCC-a i Kyoto protokola, a u sklopu pridruživanja EZ preuzima i obveze iz Smjernice EZ br. 93/389 i novih prijedloga smjernica EZ. Sva izvješća, prema navedenim preuzetim međunarodnim obvezama, Republika Hrvatska upućuje putem nadležnog ministarstva (Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja). Točnije, Ministarstvo od specijaliziranih poduzeća naruči konkretnu studiju, a zatim je prosljedi nadležnim međunarodnim instancama. Proračun emisija onečišćujućih tvari započet je u Hrvatskoj slijedom obveza CLRTAP Konvencije, a provodi se u skladu s jedinstvenom europskom metodologijom (EMEP/CORINAIR). Obveza iskazivanja emisija proizlazi i iz Zakona o zaštiti zraka (NN br. 48./95.). Glavni polazni podaci za proračun te formiranje izvješća su energetske bilance i podaci Državnog zavoda za statistiku (DZZS), a za veće izvore emisija podaci se dobivaju iz Katastra emisija u okoliš (KEO) propisanog Zakonom o zaštiti okoliša (NN br. 82./94.) i Zakonom o zaštiti zraka (NN br. 48./95.) te direktno iz upitnika i/ili mjerena. Na temelju Zakona o zaštiti zraka iz 1995. godine donesene su sljedeće uredbe :

- Uredba o preporučenim i graničnim vrijednostima kakvoće zraka (NN br. 101./96. i 2./97.)
- Uredba o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz stacionarnih izvora (NN br. 140./97., 105./02., 108./03. i 100./04.)
- Uredbu o utvrđivanju lokacija postaja u državnoj mreži za trajno praćenje kakvoće zraka (NN br. 4./02.)
- Program mjerena kakvoće zraka u državnoj mreži za trajno praćenje kakvoće zraka (NN br. 43./02.)

**EZ smjernica 96/62/EC** o ocjenjivanju i kontroliranju okolišne kakvoće zraka ("Framework Directive") bila je prva u nizu smjernica EZ-a koje su započele ugrađivati pravne odredbe osmišljene i donesene u okviru EMEP-a i ostalih protokola CLRTAP-a konvencije. Postepeno je ova smjernica nadograđivana tkz. *Smjernicama kćerima*:

- "Exchange of Information Decision", Smjernica EZ-a 97/101/EC o uspostavi ujednačene izmjene informacija i podataka iz državnih mreža i pojedinih mjernih stanica za praćenje kakvoće okolišnog zraka svih članica EZ-a.
- "First Daughter Directive", Smjernica EZ-a 1999/30/EC o smanjenju sumpornog dioksida, dušičnog dioksida i ostalih oksida dušika, partikularnih čestičnih tvari i olova u okolišnom zraku.
- "Second Daughter Directive", Smjernica EZ-a 2000/69/EC o smanjenju benzena i ugljičnog monoksida u okolišnom zraku.
- "Third Daughter Directive", Smjernica EZ-a 2002/3/EC o ozonu u okolišnom zraku.

Hrvatska je, kao pristupna zemlja članica EZ-a, bila 2004. primorana pokrenuti postupak donošenja novog **Zakona o zaštiti zraka (NN br. 178/04.)** (u nastavku ZZZ) kako bi u njega ugradila uredbe i pravilnike po uzoru na smjernice EZ-a i novu zbirnu smjernicu EZ-a prema prijedlogu smjernice EZ-a 2005/0183 (COD) o okolišnoj kakvoći zraka i čišćem zraku za Europu.

Novim ZZZ ukida se niz prethodnih uredbi te donose nove uredbe i pravilnici usklađeni s smjernicama EZ-a i to :

- Uredba o graničnim vrijednostima onečišćujućih tvari u zraku (2005.)
- Uredba o kritičnim razinama onečišćujućih tvari u zraku (2005.)
- Uredba o ozonu u zraku (2005.)
- Pravilnik o praćenju kakvoće zraka (2005.)

### 1.2.5 Praćenje i procjenjivanje onečišćenja prema Zakonu o zaštiti zraka (NN 178/04.)

Novim zakonom o zaštiti zraka prestaju vrijediti dosadašnje preporučene (PV) i granične (GV) vrijednosti i uvode se nove vrijednosti, a to su :

- *granična vrijednost (GV)* - granična razina onečišćenosti ispod koje, na temelju znanstvenih spoznaja, ne postoji, ili je najmanji mogući, rizik štetnih učinaka na ljudsko zdravlje i/ili okoliš u cjelini i jednom kada je postignuta ne smije se prekoračiti
- *tolerantna vrijednost (TV)* - granična vrijednost uvećana za granicu tolerancije, odnosno postotak granične vrijednosti za koji ona može biti prekoračena pod za to propisanim uvjetima
- *kritična vrijednost (KV)* - razina onečišćenosti čije prekoračenje predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje pri kratkotrajnoj izloženosti, pri čijoj se pojavi žurno moraju poduzeti odgovarajuće propisane mjere
- dvije veličine koje definiraju razine onečišćenosti ispod kojih se ocjenjivanje onečišćenosti smije određivati kombinacijom ili isključivo upotrebljom standardiziranih matematičkih modela i/ili drugih mjerodavnih metoda procjena prema općeprihvaćenoj praksi, a to su *donja i gornja granica procjenjivanja*

Prema tome, novim zakonom procjenjivanje onečišćenja zraka dobiva na jednakoj važnosti kao i mjerjenje onečišćenja zraka. Detaljan prikaz graničnih, tolerantnih i kritičnih vrijednosti te donje i gornje granice procjenjivanja dan je u Prilogu A.

Procjenu onečišćenja zraka uvodi ZZZ kao jednu od glavnih metoda ocjenjivanja stanja kakvoće zraka na temelju kojih se donose gradski i županijski planovi mjera za smanjivanje onečišćenja zraka, a obuhvaća utvrđivanje mjesta prekoračenja razine onečišćenosti, njihovo

trajanje i uzroke prekoračenja. Zakon, također, određuje da se praćenje razine onečišćenosti zraka obavlja trajnim mjerjenjima putem lokalnih i državnih mreža mjernih stanica te procjenjivanje kada je onečišćenje posljedica prekograničnog i regionalnog daljinskog prijenosa onečišćujućih tvari u zraku i oborina te pri procjenjivanju pozadinske onečišćenosti zraka u nenaseljenim područjima teritorija RH. Zakonom je, također, propisan i postupak utvrđivanja programa mjerjenja razina onečišćenja koji uključuje upotrebu standardiziranih postupaka procjene za područja u kojima nema izmjerениh podataka.

### **1.2.5.1 Državna mreža za trajno praćenje kakvoće zraka na teritoriju Republike Hrvatske**

Obveze koje proizlaze iz Konvencije o dalekosežnom prekograničnom onečišćenju zraka te pripadnog EMEP programa, hrvatskih propisa i smjernica EZ-a zahtijevale su uspostavu trajnog praćenja kakvoće zraka na državnoj razini.

Početkom 2002. doneseni su provedbeni propisi na temelju Zakona o zaštiti zraka: Uredba o utvrđivanju lokacija postaja u državnoj mreži za trajno praćenje kakvoće zraka (NN., br. 4/02) i Program mjerjenja kakvoće zraka u državnoj mreži za trajno praćenje kakvoće zraka (NN., br. 43/02) kojima su stvoreni uvjeti za uspostavu cijelovitog sustava praćenja i upravljanja kakvoćom zraka na teritoriju države. Na temelju mjerjenja koja će se dobiti praćenjem pokazatelja kakvoće zraka u državnoj mreži moći će se odrediti kategorizacija područja države s obzirom na kakvoću zraka. Sukladno Uredbi, do 2007. godine, na teritoriju države uspostaviti će se mreža od 22 postaje za trajno praćenje kakvoće zraka:



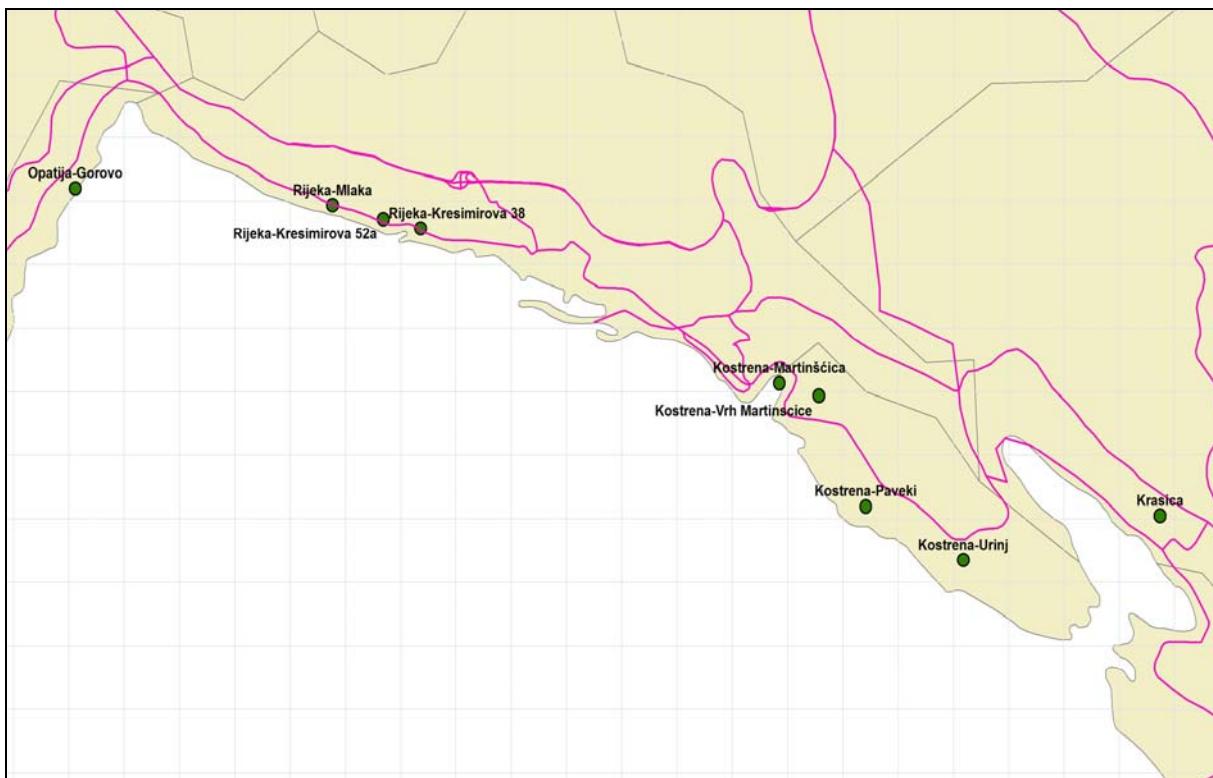
**Slika 1.14 Postaja za trajno praćenje onečišćenja zraka**

- za potrebe praćenja pozadinskog onečišćenja te regionalnog i prekograničnog onečišćenja uspostaviti će se 7 postaja na lokacijama: Desinić, Bilogora, Karojba, Zavižan (već postoji), Ravnici, Komiža i Srđ;
- za potrebe praćenja onečišćenja zraka u naseljima i industrijskim zonama uspostaviti će se 10 postaja na lokacijama: 3 u Zagrebu, 2 u Rijeci, te po jedna u Splitu, Kaštelanskom zaljevu, Kutini, Osijeku i Sisku;
- za potrebe praćenja kakvoće zraka u nacionalnim parkovima, parkovima prirode te drugim zaštićenim područjima uspostaviti će se 5 postaja na lokacijama: Dugi otok, Delta Neretve, Plitvička jezera, Kopački rit i Risnjak.

Osim državne mreže postoje i županijske, odnosno lokalne mreže, a izrazito u okolini visokoindustrializiranih područja, poput Rijeke, koje također obavljaju kontinuirano praćenje onečišćujućih

tvari, a održavaju ih županijski zavodi za javno zdravstvo ili srodne epidemiološke institucije.

Praćenje kakvoće zraka omogućuje pravovremeno informiranje javnosti o stanju kakvoće zraka, kako bi mogli na vrijeme donijeti odluke na koji način zaštiti svoje zdravlje. Poduzimajući mjere propisane za takve scenarije, čovjek je u mogućnosti izbjegći po život kritične razine onečišćenja. Danas je poznato da su, s obzirom na mjerene i modelirane podatke, najveće emisije čestica promjera do 10 mikrometara ( $PM10$ ), dušičnog dioksida ( $NO_x$ ) te ozona ( $O_3$ ).



Sl. 1.15 Lokalna mreža postaja za trajno praćenje onečišćenja zraka na riječkom području

### 1.3 Predviđanje kakvoće zraka

Kako bismo kontrolirali izvore i razinu onečišćenja nad određenim područjem, a u svrhu podržavanja donesenih propisa, potrebno je koristi učinkovite metode za mjerjenje i ocjenjivanje utjecaja zračnog onečišćenja. Ocjenjivanje ili predviđanje kakvoće zraka koristi bazu mjerenih podataka kako bi procijenila kakvoću zraka s obzirom na trenutne meteorološke i druge uvjete te na temelju razine onečišćenja utjecala na provođenje mjera potrebnih za smanjenje onečišćenja definiranih planovima gradova, županija ili državnom strategijom zaštite okoliša.

Postoje različite metode predviđanja koncentracije onečišćenja zraka. Neke metode su jednostavnije od drugih, ali pružaju manje kvalitetnije rezultate i obrnuto. Kvalitetnija predviđanja su ona koja koriste više različitih metoda procjene služeći se prednostima jednih metoda tamo gdje druge pokazuju nedostatke, a sve u svrhu postizanja točnijih prognoza kakvoće zraka.

#### 1.3.1 Metoda ustrajnosti

Koncentracija onečišćenja zraka ovisna je o vremenskim uvjetima na sinoptičkim ili regionalnim skalama koji tijekom nekoliko uzastopnih dana pokazuju sličan karakter. Prema tome se može zaključiti kako loša ili dobra dnevna kakvoća zraka pokazuje veću statističku povezanost sa sličnim vrijednostima iz prethodnih dana. Koristeći ovakve statističke sličnosti kakvoće zraka, moguće je procijeniti slične uvjete i za sljedeće dane što čini temelj ove metode. Ova metoda se uglavnom koristi kao brza referentna metoda procjene koja ne zahtijeva veću stručnost. Nedostatak ove metode je njezina nesenzibilnost na promjenjive vremenske uvjete, stoga ne može biti korištena kao jedina metoda procjene.

### 1.3.2 Klimatološka metoda

Klimatologija istražuje fizičke osnove prosječnih i ekstremnih stanja atmosfere nad određenim područjima i vremenskim periodima. Klimatološka metoda zasniva se na tezi o povijesnoj repetitivnosti. Metoda koristi činjenicu da su koncentracije onečišćenja zraka izrazito ovisne o vremenskim uvjetima. Koristeći povijesne podatke o onečišćenosti zraka nad određenim područjem, moguće je kreirati klimatske tablice koje pokazuju povijest prekoračenja graničnih vrijednosti koncentracija. Ova metoda nije precizna, ali ju je moguće koristiti uz neku drugu metodu na način da ograničava raspon mogućih procjena s obzirom na klimatske tablice.

### 1.3.3 Metoda kriterija

Metoda kriterija koristi pragove određenih meteoroloških varijabli i varijabli kakvoće zraka (kriterije) kako bi prognozirala koncentraciju onečišćavala u zraku. Ova metoda se često koristi kao primarna metoda ili u kombinaciji s drugim metodama. Bazirana je na činjenici da su određene vrijednosti meteoroloških varijabli povezane s povišenim koncentracijama onečišćenja zraka. Na primjer, povijesnim pregledom je moguće utvrditi da su povišene koncentracije onečišćavala zraka povezane s visokim temperaturama te time temperatura postaje prediktor razine onečišćenja. Za kvalitetnu procjenu ove metode potrebno je odrediti najvažnije prediktore kojima se utvrđuju pragovi koji odvajaju niske od visokih koncentracija onečišćenja. Metoda kriterija je pogodnija za izradu prognoza prekoračenih ili neprekoračenih koncentracija ili kategorizaciju razina onečišćenosti, a ne točne koncentracije.

### 1.3.4 Klasifikacijsko i regresijsko stablo (CART<sup>12</sup>)

CART je statistički postupak klasificiranja podataka u grupe prema sličnosti ili razlikama. Računalni program određuje korelaciju određenih meteoroloških varijabli prema koncentraciji onečišćavala te samostalno kreira pravove u odnosu na koje donosi odluke, odnosno procjenu koncentracija. Ova metoda predstavlja automatizirani postupak izrade kriterija te je slična prethodnoj metodi, osim što sama određuje prediktore od većeg značaja.

### 1.3.5 Regresijske jednadžbe

Regresija je statistička metoda koja opisuje ovisnost između dviju ili više varijabli pomoću linearnih ili nelinearnih viševarijabilnih jednadžbi. Metoda zahtijeva stručnost prognozera pri izradi regresijskih krivulja. Iako je regresijska metoda vrlo korištena u prognozi onečišćenja zraka kao primarna metoda, ima osobinu boljeg predviđanja srednjih vrijednosti nego vršnih koncentracija, što je loše s obzirom da je bolje precijeniti razinu onečišćenosti u korist ljudi i ekosustava.

### 1.3.6 Fenomenološka metoda – Metoda intuicije

Ova metoda je vrlo subjektivna metoda jer polazi od visoke stručnosti prognozera kao procjenitelja razine onečišćenja. Temeljena je na analizi i obradi meteoroloških informacija i

<sup>12</sup> CART – Classification and Regression Tree

podataka o kakvoći zraka korištenjem znanja prognozera. Koristi se u kombinaciji s drugim metodama kako bi korigirala rezultate objektivnih metoda procjene (kriterija, CART i regresije) s obzirom na iskustvo i zdrav razum.

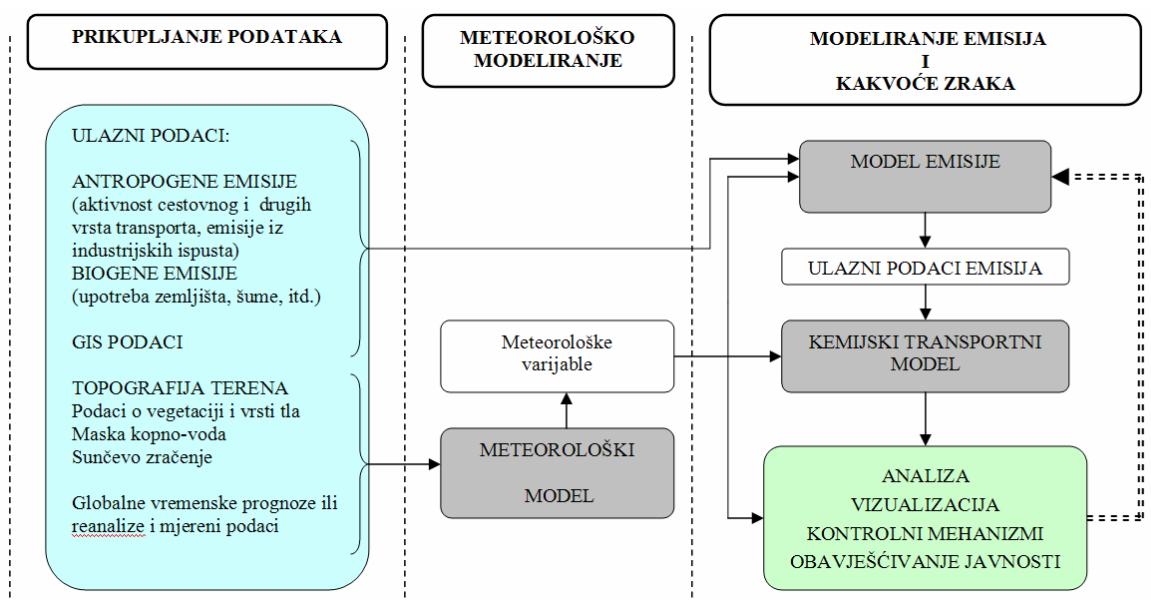
### 1.3.7 Modeliranje kakvoće zraka

Modeliranje kakvoće zraka predstavlja determinističku metodu procjenjivanja koja se prema točnosti može usporediti s metodom intuicije. Njome se pokušava matematički opisati procese koji utječu na kakvoću zraka. Deterministički modeli kakvoće zraka su se koristili za procjenu utjecaja rasta populacije i kontrole emisija onečišćivača, a danas sve više u svakodnevnim prognozama kakvoće zraka. Pri planiranju kakvoće zraka također su korisni jer omogućuju analizu testnih scenarija te epizoda sa specifičnim meteorološkim uvjetima omogućavajući uvid u ponašanje i reaktivnost mnogih onečišćujućih tvari u atmosferi. Izrada ovakvih sustava za modeliranje može trajati nekoliko godina, a njeno pokretanje i rad zahtijeva veliki smještajni kapacitet na računalu te računala visokih performansi kako bi se proračunale koncentracije pojedinih onečišćujućih tvari u razumnom vremenskom periodu koji za ovakve sustave iznosi od 6 do 12 sati.

Modeliranje kvalitete zraka predstavlja sustav više modela koji zajedničkim radom simuliraju emisiju, transport, difuziju, transformaciju i redukciju onečišćujućih tvari u zraku. Takav model kakvoće zraka može se podijeliti u tri modula:

- Meteorološki modeli
- Modeli emisije
- Kemijski transportni modeli

Pored navedana tri modula, mogući je i četvrti modul. Riječ je o modulu za vizualizaciju i analizu radi donošenja odluka i konačnih ocjena koje proizlazi tek iz kvalitetne obrade podataka dobivenih prethodnim modelima. Vizualizacija i analiza su u većini slučajeva izdvojeni od ostatka procesa modeliranje kakvoće zraka.



Sl. 1.16 Struktura modeliranja kvalitete zraka

### 1.3.7.1 Meteorološki modeli

Meteorološki modeli mogu se klasificirati kao *prognostički* i *dijagnostički modeli*. Prognostički modeli se baziraju na rješavanju nestacionarnih hidrodinamičkih i termodinamičkih jednadžbi primjereno modificiranih za opisivanje ponašanja atmosferskih procesa. Ovi modeli se još nazivaju *dinamički* modeli ili *modeli primitivnih jednadžbi*. One omogućavaju procjenu evolucije atmosferskog stanja u vremenu.

Dijagnostički meteorološki modeli dobavljaju informacije o poljima vjetrova ili drugih meteoroloških varijabli na način da zadovolje određene fizikalne zakonitosti i ograničenja. Oni opisuju stanje u trenutku inicijalizacije modela što im ne omogućuje prognozu već samo konstatiranje, dijagnozu meteoroloških varijabli. Nazivaju se i *kinematski* modeli.

Tendencija je korištenja prognostičkih modela, kao pretprocesorskog meteorološkog programa, kreiranje meteoroloških polja kao ulaznih varijabli za modele emisije i kemijske transportne modele. Takvi modeli su bazirani na istim primitivnim jednadžbama kao i numerički prognostički modeli (*NWP*) koji služe za definiranje vremenskih prognoza, ali se razlikuju od njih veličinom područja koje pokrivaju. Obično se kemijski transportni modeli primjenjuju na području manjem od 1000 km (mezoskala) s rezolucijom od nekoliko kilometara, dok su NWP modeli uglavnom sinoptički ili regionalno orijentirani. Prema tome meteorološke modele razlikujemo prema prostornoj skali na koju su primjenjivi. Jednu takvu podjelu meteoroloških skala uvodi Orlanski (1975) (Tabela 1.2) gdje su za svaku vrstu prostorne skale prikazani pripadajući numerički modeli.

**Tabela 1.2 Meteorološke prostorne skale i pripadni meteorološki modeli**

Prostorna skala	Raspon	Primjenjivi model
mikroskala	< 2 km	Large Eddy Simulation (LES) model
$\gamma$ -mezoskala	2-20 km	Non-hydrostatic (ARPS)
$\beta$ -mezoskala	20-200 km	Non-hydrostatic, hydrostatic (MM5, RAMS, WRF, MEMO6)
$\alpha$ -mezoskala	200-2000 km	Hydrostatic (Eta, AVN)
sinoptička, regionalna	> 1000 km	NWP (GFS/NCEP, GEM, JMA, ECMWF)

### 1.3.7.2 Modeliranje emisija onečićenja

Inventar atmosferskih emisija predstavlja sakupljene podatke o emisijama onečićivača zraka u određenom vremenskom periodu te nad određenim geografskim područjem promatranja. Emisije se u pravilu prikupljaju mjeranjima na reprezentativnim lokacijama (izvori onečićenja, prometnice, i.e. vrste onečićivača zraka), a uključuju sve emitirane onečićujuće tvari iz pojedinih izvora. Također je moguće koristiti podatke o aktivnosti pojedinih onečićivača zraka te ih korelirati s emisijama koje ti izvori emitiraju u atmosferu. Postoje dva pristupa u izradi inventara emisija: *top-down* i *bottom-up* pristup. *Bottom-up* pristup se najčešće koristi u svrhu kreiranja godišnjih izvješća na način da se najprije projicijene ili, na temelju mjeranja, utvrde emisije za svako geografsko područje za koje se izrađuje inventar te konačno sumiraju u ukupne godišnje vrijednosti emisija ili direktno koriste u kontinuiranoj prognozi onečićenja zraka u realnom vremenu. Top-down pristup se koristi da se na temelju višegodišnjih mjeranja te prikupljenoj statistici aktivnosti pojedinih izvora onečićenja utvrde profili emisija s obzirom na vremenske, prostorne te kemijske odrednice. Takvi profili definiraju faktore za svaku odrednicu te ih se primjenjuje na ukupne

godišnje vrijednosti emisija iz pojedinih izvora kako bi procijenili emisiju onečišćivača u određenom vremenskom periodu ili epizodi za koju izrađujemo prognozu kakvoće zraka.

Modeli emisije imaju funkciju procesuiranja prikupljenih emisija te na temelju njih izraditi emisijske rubne i inicijalne uvjete za kemijske transportne modele. Za proračun određenih emisija iz podataka o aktivnosti onečišćivača potrebno je koristiti meteorološke podatke kao prediktor varijable što znači da modeli emisija koriste rezultate meteoroloških mezoskalnih modela kao ulazne podatke.

Moguće je izdvojiti nekoliko poznatih modela za procesuiranje emisija i njihovu prilagodbu dalnjem korištenju:

- EPS 2.0 – Emission Processing System (EPA, 1992.g.)
- EMS-95, EMS-2002 – Emission Modelling System (Bruckman, 1993.g.)
- CORINAIR/EMEP Emission inventory modelling system (1994.g.)
- SMOKE – Sparse Matrix Operator Kernel Emissions modelling system (Coats, 1996.g.)
- EMICAT2000 – EMission modelling for CATalonia (Parra, 2004.)

### 1.3.7.3 Kemijski transportni modeli

Glavne zadaće kemijskih transportnih modela su da matematički opišu fenomene onečišćenja zraka. Trodimenzionalni modeli kakvoće zraka, odnosno kemijski transportni modeli, mogu biti Lagrangeovog ili Eulerovog tipa ovisno o vrsti koordinatnog sustava kojim se simuliraju vremenski promjenjive distribucije koncentracija onečišćavala zraka.

Lagrangeovi modeli ili modeli trajektorija prate prostornu promjenu pojedinih ćelija domene tijekom vremena koristeći pomicne koordinatne sustave te meteorološke podatke kako bi transportirali i difundirali onečišćavala. Također mogu sadržavati i kemijske mehanizme za transformaciju onečišćavala s obzirom na niz kemijskih reakcija koje kemijski mehanizam modelira. Ovakav princip modeliranja koncentracija onečišćavala je računski isplativ i primjenjiv samo na limitirani broj individualnih izvora onečišćenja s obzirom da je većina kemijskih mehanizama (transformacija primarnih u sekundarna onečišćavala) nelinearnog karaktera te računski vrlo zahtjevna. Među važnijima izdvajamo HY-SPLIT Chem<sup>13</sup> regionalni Lagrangeov model (Stein, 2000.).

Eulerovi modeli kakvoće zraka koriste fiksnu domenu u obliku mrežnog ili kutijastog modela, odnosno fiksni Kartezijev referentni sustav gdje numeričku mrežu predstavljaju monotono promjenjive vertikalne i jednoliko raspoređene horizontalne ćelije numeričke mreže. Za svaku ćeliju izračunavaju se jednadžbe kemijskih mehanizama. Ovakvi modeli pružaju mogućnost izrade trodimenzionalnih polja koncentracija više onečišćavala odjednom što uzrokuje veće vrijeme proračunavanja. Navest ćemo najpoznatije Eulerove modele kakvoće zraka:

- The California Grid Model: **CALGRID** (Yamartino, 1992).
- The Comprehensive Air Quality Model with Extensions: **CAMx** (Environ, 1998).
- The Community Multiscale Air Quality model: **CMAQ** (U.S. EPA, 1998).
- The Multiscale Air Quality Simulation Platform: **MAQSIP** (Odman and Ingram, 1996).
- The SARMAP Air Quality Model: **SAQM** (Chang, 1996).
- The Urban Airshed Model with Aerosols: **UAM-AERO** (Lurmann, 2000; Lurmann, 1997).

<sup>13</sup> HY-SPLIT CheM – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories with a generalized nonlinear Chemistry Module

- The Urban Airshed Model with Carbon Bond IV Chemistry: **UAM-IV** (Morris, 1990).
- The Variable Grid Urban Airshed Model: **UAM-V** (Systems Applications International, 1999).
- Model for calculations of transboundary transport and deposition of heavy metals over Europe **MSC-E** (EMEP/UNECE, 2000).

Bez obzira na vrstu kemijskog transportnog modela svi zahtijevaju pripremljene rubne i inicijalne uvjete za svaku ćeliju domene dobivene iz meteoroloških modela i procesiranjem emisija. Od meteoroloških podataka koriste se satna, vertikalna i horizontalna polja vjetrova, temperatura, vlažnosti, visine miješanja, intenziteta sunčevog zračenja te nekih dodatnih izvedenih veličina kao što su karakteristike oblaka, vjerojatnost nastanka padalina i njihova brzina depozicije te vertikalna difuzivnost. Takve podatke dostavljaju isključivo prognostički modeli uskladeni na domenu, numeričku mrežu kemijskog transportnog modela. Modeli procesiranja emisija predstavljaju ključan segment kvalitetnog modeliranja kakvoće zraka. Točnost ulaznih podataka o emisijama direktno utječe na točnost procjene razine onečišćenja zraka. Prema tome, potrebno je pripremiti detaljne vremenski i prostorno diskretizirane procjene emisija važnih emitiranih tvari za fotokemijske mehanizme kemijskih transportnih modela.

## 1.4 Cilj magistarskog rada

Visoka razina zračnih polutanata tijekom ljetnih mjeseci ima jak utjecaj podjednako na ekosustav i na ljudsko zdravlje. Kompleksna topografija Riječkog zaljeva utječe na iznimno složena strujanja zraka te je time pogodna za evaluaciju meteoroloških i modela kakvoće zraka. Pored toga prisutnost velikog broja onečišćivača zraka omogućuje veliku koncentraciju emitiranih onečišćavala čime područje postaje vrlo osjetljivo na zagađenje troposferskim ozonom.

Modeli kakvoće zraka, bez obzira na svoju kompleksnost, pokazali su dobru usporedivost rezultata s mjeranim vrijednostima te mogućnost procjenjivanja na područjima gdje nema dovoljno gustih mjereneh podataka. Prema dosadašnjim istraživanjima, višeskalni ugnježđeni model kakvoće zraka MM5-SMOKE-CMAQ pokazao se kao koristan alat za prognozu kakvoće zraka kod vrlo kompleksnih terena te prema tome možemo definirati ciljeve ovoga rada:

1. Izraditi i primijeniti sustav MM5-SMOKE-CMAQ modela kakvoće zraka kako bi poslužio kao snažan alat u ocjeni utjecaja raznih meteoroloških uvjeta i izvora emisija na kakvoću zraka riječkog područja.
2. Analizirati i interpretirati atmosfersku dinamiku te fizikalno-kemijske procese glavnih onečišćavala nad Riječkim zaljevom te evaluirati dobivene rezultate s obzirom na mjerena iz lokalnih i državnih mjernih postaja za trajno praćenje kakvoće zraka

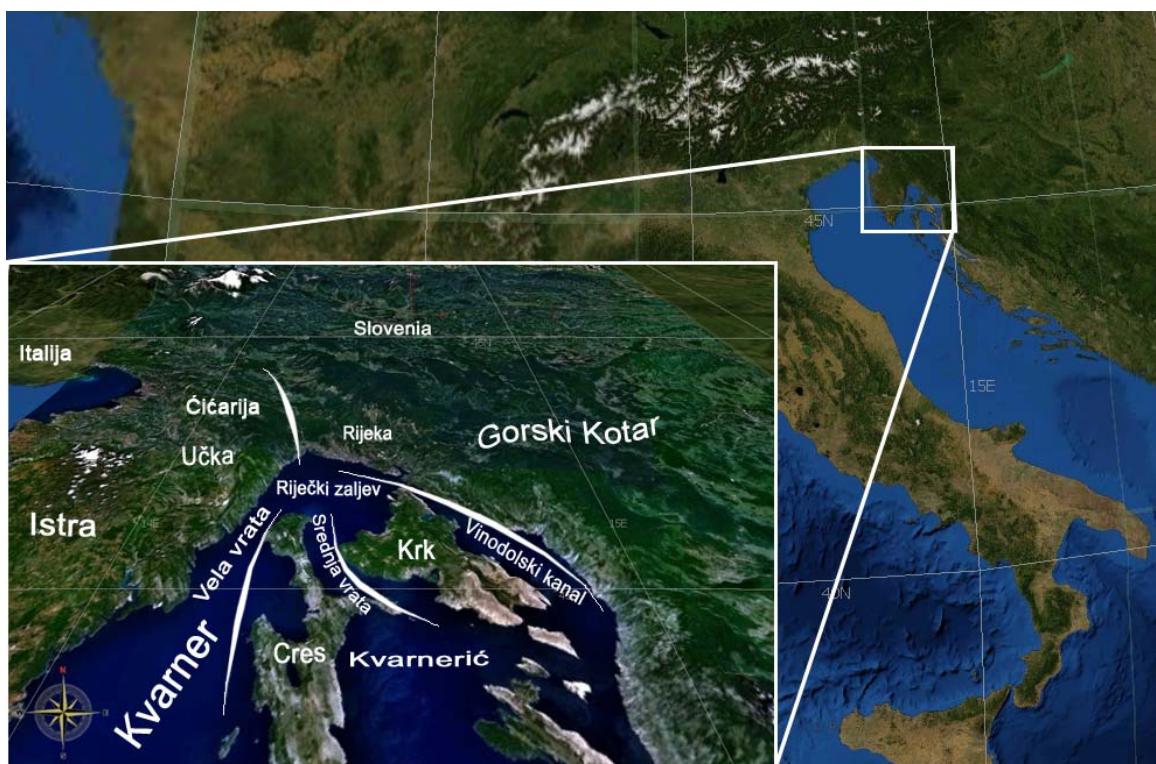
Postizanje ovih ciljeva zahtijeva niz sljedećih podciljeva:

1. Za odabранo područje šireg riječkog područja pripremiti godišnje mjerene podatke iz lokalnih i državnih mjernih postaja za trajno praćenje kakvoće zraka te na temelju njih izdvojiti epizodu s najgorim povišenim koncentracijama onečišćenja zraka za koju će se provesti simulacija (**Poglavlje 2**)
2. Osigurati meteorološke ulazne podatke iz operativnih numeričkih meteoroloških modela globalne atmosferske cirkulacije za odabrani period
3. Prilagoditi meteorološki model MM5 na način da se omogući fleksibilnost pri izmjeni pojedinih parametara modela te njegova evaluacija za odabranu epizodu (**Poglavlje 3**)
4. Ispitati potrebnu i dovoljnu rezoluciju (horizontalnu i vertikalnu) modela prikladnu za opisivanje dinamike atmosferskih onečišćavala te meteoroloških veličina. (**Poglavlje 3**)
5. Pripremiti i prilagoditi emisije iz raznih izvora onečišćenja u format SMOKE emisijskog modela te aplicirati SMOKE model za procesuiranje satnih koncentracija emisijskih onečišćavala. (**Poglavlje 4**)
6. Primijeniti CMAQ model kakvoće zraka na odabranu fotokemijski osjetljivu epizodu nad riječkim područjem te analizom rezultata utvrditi i opisati uzroke pojave povišenih koncentracija onečišćavala, osobito nastanka ozona. (**Poglavlje 5**)
7. Evaluirati kvalitetu dobivenih rezultata simulacije provedene apliciranim sustavom uspoređivanjem rezultata modeliranja s prikupljenim mjerennim vrijednostima. (**Poglavlje 5**)

## 2 ODABIR FOTOKEMIJSKI SPECIFIČNE EPIZODE ZA MODELIRANJE KAKVOĆE ZRAKA NAD RIJEČKIM PODRUČJEM

Šire riječko područje, koje uključuje čitavi Riječki zaljev između  $14^{\circ}15'$  -  $14^{\circ}35'$  zapadne geografske dužine i  $45^{\circ}$  -  $45^{\circ}20'$  sjeverne geografske širine, obilježavaju specifična geografska obilježja. Strma obala koja se proteže od Učke na sjeveru pa duž cijele jadranske obale te mnoštvo otoka i njihovih međusobnih kanala uzrokuju nastanak raznovrsnih meteoroloških lokalnih fenomena koji utječu na stvaranje kako loših tako i dobrih stanja kakvoće zraka. Ljetne mjesecе odlikuju pojačano sunčev zračenje što pogoduje učestalosti fotokemijskih reakcija u troposferi. Stabilno atmosfersko stanje pod utjecajem polja niskog gradijenta tlaka nad cijelim sjevernim Jadranom uzrokuje pojavu lokalnih obalnih cirkulacija koje utječu na slabu horizontalnu disperziju onečišćujućih tvari u zraku zadržavajući ili periodički vraćajući onečišćujuće tvari na ista područja nastanka.

Riječki zaljev posjeduje četiri moguća dotoka svježeg zraka (Sl. 2.1), ali i unos prekograničnog onečišćenja putem orografske kanalizacije vjetrova te vjetrova niz padine i doline. Takve kritične kanalizacije su Vela Vrata između otoka Cresa i Učke iz pravca Kvarnera, Srednja Vrata između otoka Cresa i otoka Krka iz pravca Kvarnerića, Vinodolski kanal između otoka Krka i obale iz pravca Senjskog kanala te kanal između obronaka Ćićarije i slovenskih i gorskokotarskih gorja na potezu između Rupe i Preluke kod Voloska.



Sl. 2.1 Geografski smještaj i orografske kanalizacije Riječkog zaljeva te njegov smještaj na sjevernom Jadranu

Riječko područje predstavlja jedno od industrijski razvijenijih područja Hrvatske. Dugogodišnja tradicija i razvoj Riječke luke, te geostrateški položaj Sjevernog Jadranu uvrstili su Rijeku, i ostale sjevernojadranske lučke gradove, na svjetsku poslovnu scenu kao važna pomorska čvorista čime je osiguran nesmetan cestovni i željeznički transport sirovina za unutrašnjost kontinentalne Hrvatske i susjednih zemalja Istočne Europe kao i za razvoj

industrijskih postrojenja u neposrednoj blizini Rijeke i šire okolice. Osim pozitivnih aspekata gospodarskog razvoja postoje i negativni utjecaji koji se odnose na onečišćenje okoliša. Emisije onečišćujućih tvari, koje onečišćivači odnosno industrijski dimnjaci ili prometala emitiraju u atmosferu, predstavljaju ozbiljnu prijetnju ljudskom zdravlju i ekosustavu. Tijekom posljednjih 16 godina, od osnutka Republike Hrvatske, redovito su se provodila mjerena emisija iz pojedinačnih izvora onečišćenja te razina onečišćenosti zraka na lokalnim (područnim) i državnim mјernim postajama za trajno mjerjenje kakvoće zraka. Prema Katastru emisije u okoliš (KEO) Agencije za zaštitu okoliša (AZO) te MZOPUG-vog izvješća „Emisija onečišćujućih tvari u zrak na području Republike Hrvatske“ za 2002., 2003., i 2004. godinu, evidentno je da se na širem riječkom području emitira otprilike 20 - 30% ukupne godišnje emisije  $\text{SO}_2$  te 10 - 40% ukupne godišnje emisije  $\text{NO}_x$ . Prema Tabeli 2.1 najveći onečišćivači na riječkom području su TE Rijeka i Rafinerija nafte Rijeka te TE Plomin smještena 60 km izvan Rijeke u Plominskom zaljevu.

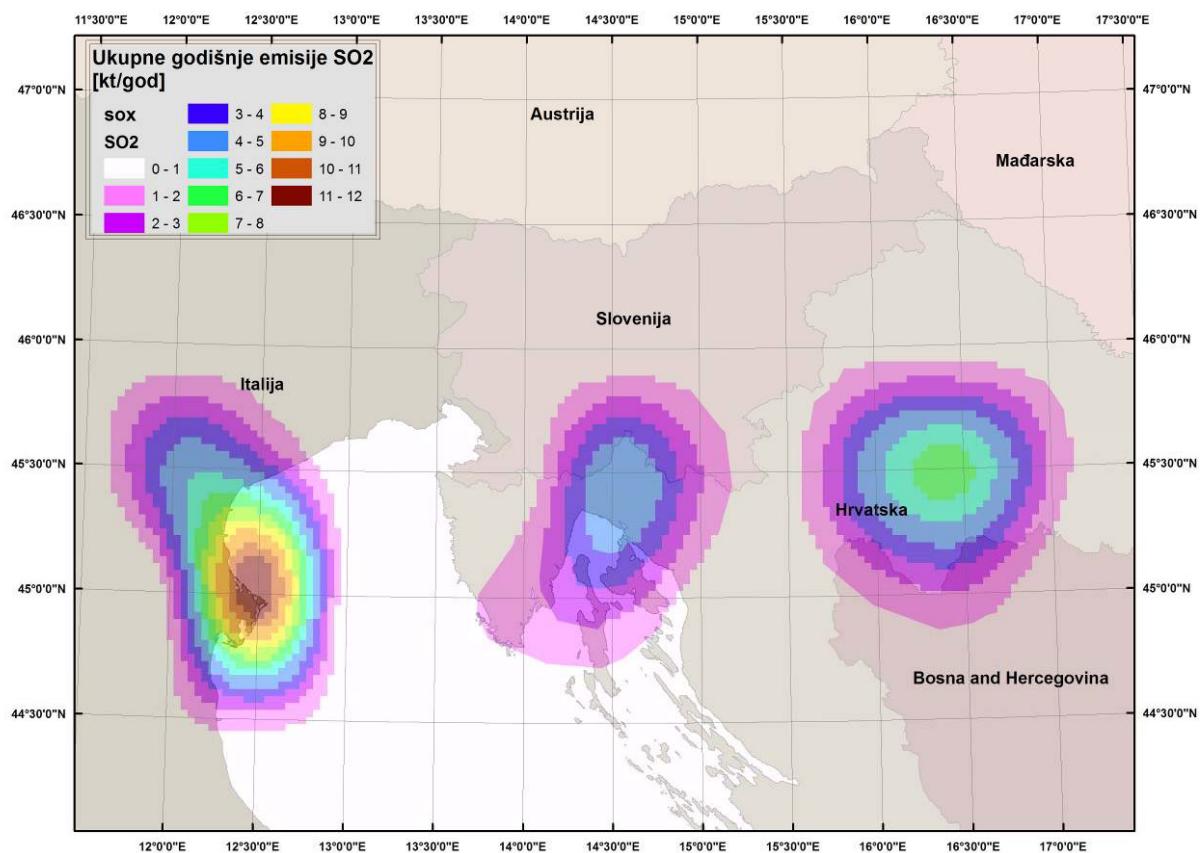
**Tabela 2.1 Emisija značajnijih pojedinačnih izvora onečišćenja i udjel u ukupnoj emisiji Hrvatske (2002.)**

	$\text{SO}_2$		$\text{NO}_x$		CO	
	t	%	t	%	t	%
1. TE Sisak	4215,4	6,2	2319,4	3,3	27,3	0,01
2. TE Rijeka	4908,6	7,3	1631,9	2,4	22,5	0,01
3. TE Plomin	4289,8	6,4	3245,2	4,7	279,9	0,09
4. TE-TO Zagreb	2322,6	3,4	1195,7	1,7	159,7	0,05
5. EL-TO Zagreb	1144,7	1,7	1305,3	1,9	89,6	0,03
6. TE-TO Osijek	366,9	0,5	127,0	0,2	20,6	0,01
7. PTE Osijek	0,0	0,0	267,6	0,4	13,9	0,00
8. KTE Jertovec	0,0	0,0	451,9	0,7	29,0	0,01
9. Rafinerija Rijeka	8932,7	13,2	1656,2	2,4	730,4	0,24
10. Rafinerija Sisak	6193,3	9,2	1652,5	2,4	123,7	0,04
11. Petrokemija Kutina (TG+TČ)	1722,0	2,6	2106,0	3,0	26863,0	8,71
12. Dalmacijacement Split*	346,9	0,5	2915,5	4,2	782,0	0,25
13. Našice cement Našice*	0,0	0,0	894,7	1,3	308,1	0,10
14. Cementara Koromačno*	57,9	0,1	628,0	0,9	181,2	0,06
Ukupno VTI	34500,8	51,1	20396,9	29,4	29630,8	9,60
<b>Ukupno HRVATSKA</b>	<b>67474,0</b>	<b>100,0</b>	<b>69290,9</b>	<b>100,0</b>	<b>308507,7</b>	<b>100,00</b>

\* - Emisija u cementarama je procijenjena na temelju potrošnje goriva i proizvodnje cementa.

Za ljetnih mjeseci, točnije vikendima tijekom lipnja, srpnja i kolovoza, pojačane automobilske kolone nisu rijetkost za riječke prometne pravce. Među glavnim sastojcima ispušnih plinova iz cestovnih vozila nalaze se i uzročnici nastanka troposferskog ozona (prekurzori) ( $\text{NO}_x$ , VOC i dr.) koji uvelike pridonose povećanju fotokemijskih reakcija u troposferi, odnosno nastanku sekundarnih onečišćujućih tvari. Prema tome pored industrijskih postrojenja, riječke prometnice ljeti postaju drugi važan izvor onečišćenja zraka.

Onečišćenje zraka nad riječkim područjem ne može se pripisati isključivo onečišćivačima toga područja. Na povišenje koncentracija onečišćenja zraka mogući je i utjecaj dalekosežnog transporta onečišćujućih tvari s udaljenih lokacija poput industrijski razvijenog sjevera Italije, prometnica i industrije kontinentalnih krajeva Hrvatske i Slovenije (Sl. 2.2). Da bi do toga došlo potrebni su specifični vremenski uvjeti koji će transportirati onečišćujuće tvari u Riječki zaljev. S obzirom na atmosfersku dinamiku možemo zaključiti kako su vremenski uvjeti ponovljivi za svaku dobu dana, tjedna, mjeseca i godine te specifični za svaki mikrolokalitet koji posjeduje kompleksnu topografiju terena kao što je posjeduje šira okolica riječkog područja.



**Sl. 2.2 Godišnje emisije sumpornog dioksida SO<sub>2</sub> tijekom 2003. godine nad područjem sjevernog Jadran-a, kontinentalne Hrvatske i Slovenije, a za sektor S1 *Izgaranje u termoenergetskim postrojenjima i postrojenjima za pretvorbu energije* prema SNAP97 nomenklaturi klasifikacije izvora onečišćenja sukladno EMEP protokolu (Izvor: CORINAIR/EMEP baza emisija)**

## 2.1 27. – 31. 7. 2005. : epizoda za evaluaciju sustava modeliranja kakvoće zraka

Modeliranje kakvoće zraka jedna je od metoda procjenjivanja općeprihvaćenih u svijetu. Kompleksni sustavi matematičkih modela opisuju atmosferska stanja, kretanje zračnih masa, kompleksne fotokemijske reakcije te transport onečišćavala od globalnih pa sve do lokalnih razina. Odabrani sustava za modeliranje kakvoće zraka MM5-SMOKE-CMAQ jedini je takav sustav koji omogućuje kontinuirano procjenjivanje kakvoće zraka u realnom vremenu. U većini državnih i županijskih izvještaja o procjeni utjecaja zračnog onečišćenja na okoliš prikazuju se srednje godišnje vrijednosti te 98-percentilne godišnje vrijednosti koncentracija najvažnijih onečišćujućih tvari u zraku. Takve informacije nisu dostatne da prikažu dinamiku nastanka, akumulacije, disperzije i eventualne depozicije ili nestanka onečišćujućih tvari nad promatranim područjem, već su jedino potrebne za utvrđivanje godišnjih trendova maksimalnih i srednjih vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari radi izvješćivanja međunarodnih organizacija s obzirom na preuzete obveze. Modeliranje kakvoće zraka omogućuje efikasnu metodu prognoziranja kojom se može utvrditi utjecaj vremenskih uvjeta, izvora povišenih koncentracija te mehanizme njihova nastanka za vremenski korak od jednog sata na više te za dan do dva unaprijed. Prije uspostave kontinuiranog prognoziranja kakvoće zraka što je i glavna zadaća sustava MM5-SMOKE-CMAQ za modeliranje onečišćenja zraka, ovakvi sustavi moraju se podvrći strogim evaluacijama i verifikacijama s obzirom na postojeća mjerena nad određenim područjem.

Područna mreža za trajno mjerjenje onečišćenja zraka nad Riječkim zaljevom u sustavu je Zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije koja omogućuje javan uvid u mjerene vrijednosti pojedinih onečišćujućih tvari na bazi dnevnih srednjih vrijednosti za period od protekle godine. Kako bismo odabrali vremenski period, koji će biti reprezentativan za definiranje epizode za evaluaciju modela kakvoće zraka, potrebno je postaviti kriterije odabira:

1. Odabrati godinu za koju postoje dovoljno kvalitetni mjereni podaci (odbaciti neispravne (nerealne) mjerene rezultate), a iz mjernih postaja s dovoljnom učestalosti mjernih podataka (više od 60% kvalitetnih mjerena)
2. Posebno istaknuti prednost odabira mjeseca u kojima postoji povećana učestalost fotokemijskih procesa (proljeće, ljeto).
3. Odabrati period sa stabilnim atmosferskim stanjem koje utječe na smanjenu horizontalnu disperziju i nedostatak konvektivnog miješanja zraka.
4. Vremenski period mora trajati dovoljno dugo (3-5 dana) kako bi omogućio dovoljno vremena za transport onečišćujuće tvari s rubova domene modela kakvoće zraka (granice šireg područja sjevernog Jadrana) na područje za koje postoje mjereni podaci (Riječki zaljev).
5. Na temelju analize kvalitetnih mjerenih podataka potrebno je odabrati onaj vremenski period koji pokazuje u cijelom svom rasponu konstantno povišene (ili maksimalne) koncentracije mjerenih onečišćujućih tvari ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , TSP, benzen, itd.) na većini mjernih stanica.

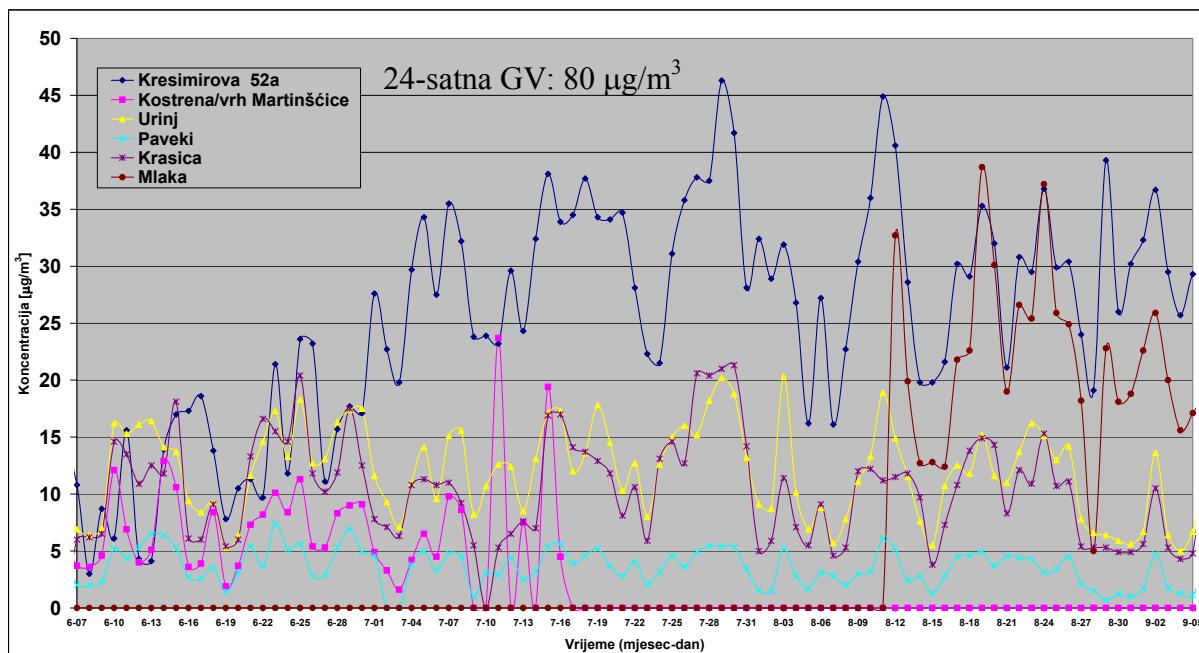
Prema postavljenim kriterijima odabранo je ljetо 2005. godine kao period s dovoljno kvalitetnim mjerenim podacima iz sljedećih mjernih postaja lokalne županijske mreže:

<i>Monitoring</i>	<i>Lokacija</i>	<i>Parametri</i>
<b>Lokalna mreža pod nadzorom Nastavnog zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije</b>	Čandekova ul.	$\text{SO}_2$ , dim
	Ul. F. la Guardia	$\text{SO}_2$ , dim
	Krešimirova ul. 52a NZZJZ	$\text{SO}_2$ , dim , $\text{NO}_2$ , ULČ i sadržaj metala u njima, $\text{NH}_3$ , PAU, UTT
	AP Krešimirova ul. 52a (autom. postaja u NZZJZ)	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , $\text{O}_3$
	Krešimirova ul. 38 (AP)	PM-10
	Mlaka	$\text{NO}_2$ , $\text{NH}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$
	Draga	$\text{SO}_2$ , dim
	Volosko	$\text{SO}_2$ , dim
	Kostrena	$\text{SO}_2$ , dim, $\text{NH}_3$ , UTT
	Bakar	$\text{SO}_2$ , dim, $\text{NH}_3$ , UTT
	Kraljevica	$\text{SO}_2$ , dim, $\text{NO}_2$ , $\text{NH}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$ , UTT
	Krasica	$\text{SO}_2$ , dim, $\text{H}_2\text{S}$
	Jezero Vrana	$\text{SO}_2$ , dim, UTT
	Delnice	$\text{SO}_2$ , dim, UTT
	Opatija (AP)	$\text{O}_3$
	Lividraga kod Gerova	UTT
	Omišalj	$\text{SO}_2$ , dim, UTT
	Jezero kod Njivica (otok Krk)	$\text{SO}_2$ , dim, UTT
	Akumulacija Ponikve na Krku	UTT
<b>"Rafinerija nafte Rijeka" – Urinj</b>	Inženjering (AP)	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , ULČ, CO, $\text{O}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$ , formaldehid
	Vrh Martinšćice (AP)	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , ULČ, CO, $\text{O}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$ , BTX
	Krasica (AP)	$\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , ULČ, CO, $\text{O}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$ , BTX
<b>Brodogradilište "Viktor Lenac"</b>	Martinšćica (AP)	ULČ
<b>Rafinerija "Maziva Rijeka"</b>	Turnić (AP)	$\text{SO}_2$ , $\text{H}_2\text{S}$ , BTX, NO/ $\text{NO}_2$ , ugljikovodici (ukupni ugljik, $\text{CH}_4$ , nemetanski ugljikovodici)

Sl. 2.3 Pregled mjerenih parametara po postajama lokalne mreže monitoringa zraka Primorsko-goranske županije

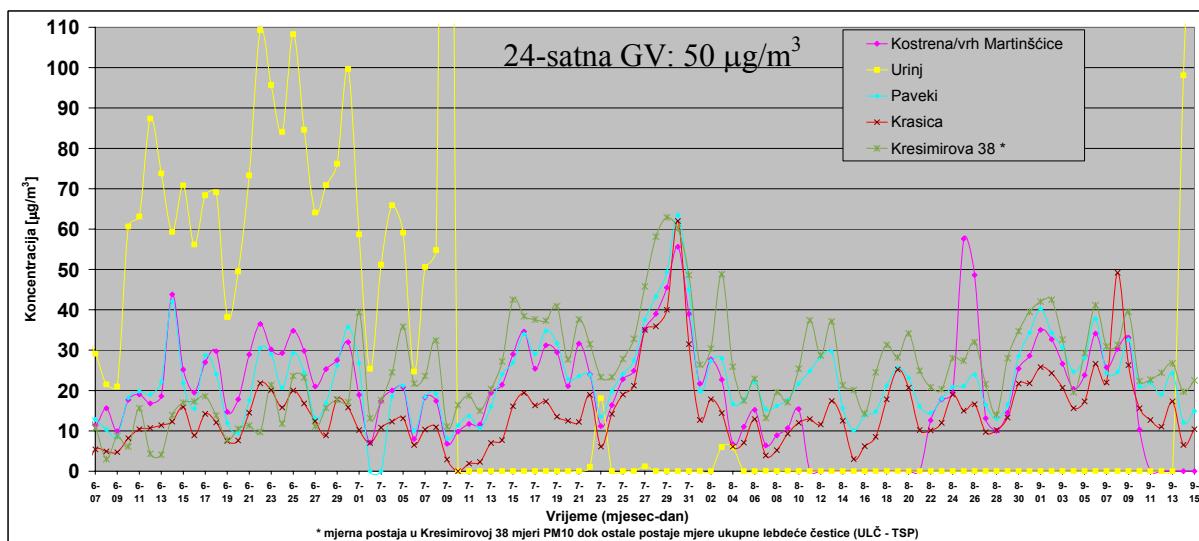
Neke od mjernih postaja obavljaju mjerjenja vrlo rijetko (svaka četiri dana) te su njihova mjerena prema kriterijima zanemarena kao nedovoljno učestala. To su, primjerice, Kraljevica, Delnice, Gerovo, Volosko. Neke mjerne postaje pokazuju kvarove instrumenata (dugi niz nuliranih koncentracija na pojedinoj mjernoj stanici) kao na primjer merna postaja Vrh Martinšćice u Kostreni od 17.07.2005. do kraja rujna te merna postaja na Mlaci u centru Rijeke od svibnja do sredine kolovoza. Prema tim kriterijima preostale mjerne stanice, koje pokazuju dovoljno kvalitetne koncentracije onečišćujućih tvari, prikazuje Sl. 1.15, a njihove koncentracije sljedeći par grafikona (Sl. 2.4 - Sl. 2.7).

Koncentracije NO<sub>2</sub> (Sl. 2.4) izrazito su povišene u području grada Rijeke u Krešimirovoj ulici i na Mlaci zbog pojačanog prometa, a to potvrđuje i činjenica da 60% ukupne emisije NO<sub>2</sub> u zrak potječe iz cestovnog transporta.



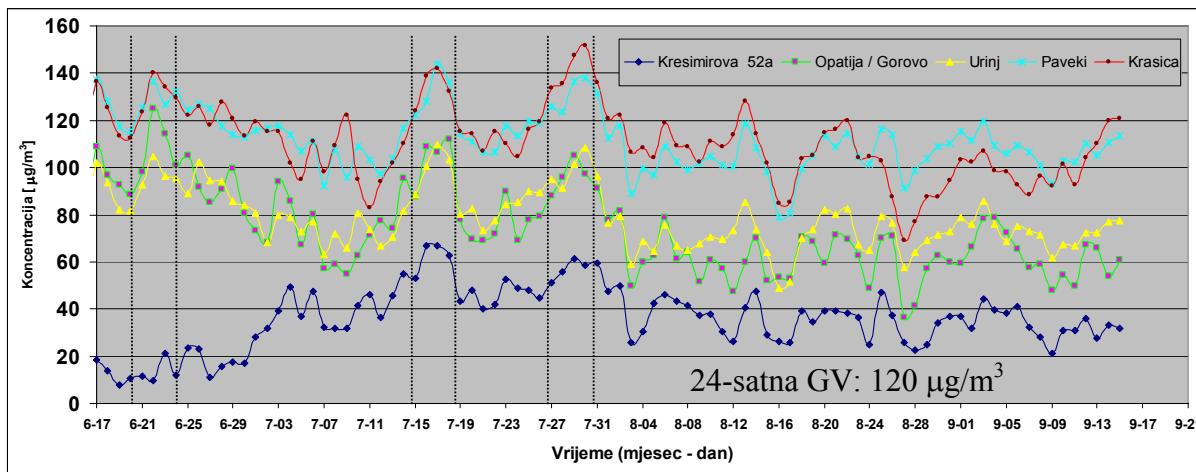
Sl. 2.4 Dnevne prosječne koncentracije NO<sub>2</sub> tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine

Koncentracija NO<sub>2</sub> izrazito je povišena tijekom srpnja i kolovoza s povremenim ponorima koji se mogu pripisati vikend - tjedan varijacijama cestovnog transporta ili periodičkom utoku dalekosežnih onečišćujuće tvari u Riječki zaljev.



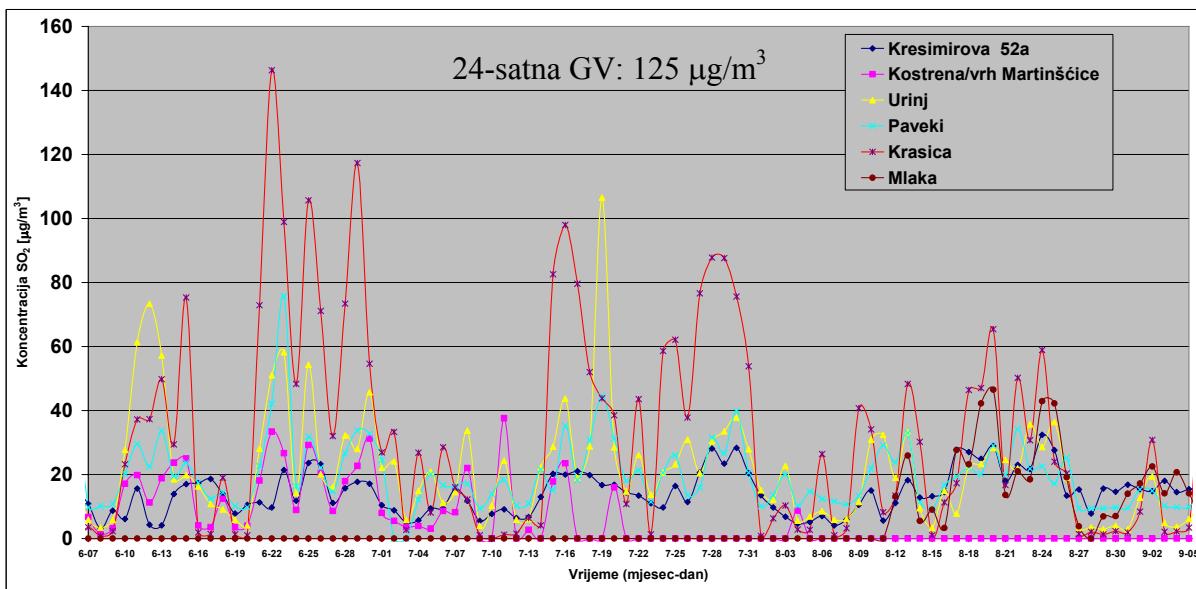
Sl. 2.5 Dnevne prosječne koncentracije TSP i PM<sub>10</sub> tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine

Koncentracije čestica u zraku tijekom ljetnog perioda 2005. godine (Sl. 2.5) većinom su ispod granične vrijednosti, osim tijekom perioda vršnih koncentracija od 27. do 31. srpnja koji je zabilježen na svim mjernim postajama. Mjerenja na postaji u Urinju tijekom proljetnih mjeseci su zanemarena zbog kvara na mjernom uređaju.



Sl. 2.6 Dnevne prosječne koncentracije  $O_3$  tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine

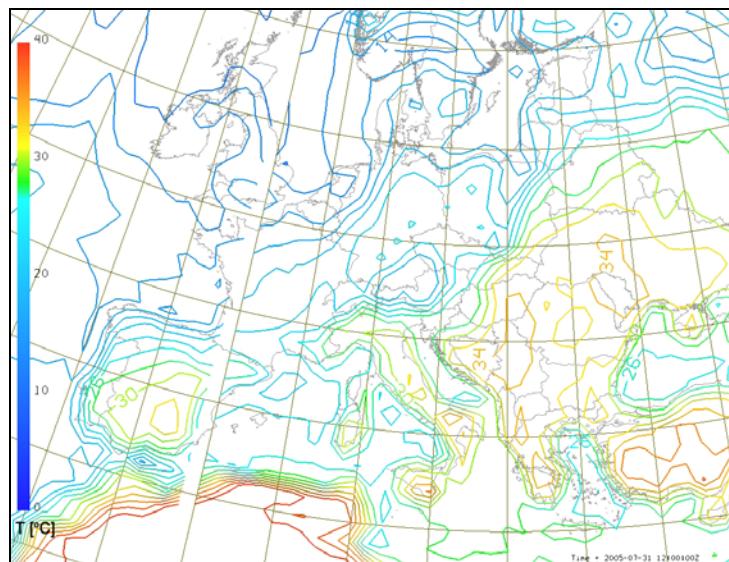
Učestalost ljetnih povišenih dnevnih koncentracija ozona iznad granične vrijednosti nije rijetkost. Povišeno sunčev zračenje utječe na učestalije fotokemijske reakcije, a time na veće koncentracije ozona. Ako se tome pridoda povišena emisija ozonskih prekurzora, očekivano se i potvrdilo mjerjenjima (Sl. 2.6). Istim se tri duža perioda prekograničnih vrijednosti troposferskog ozona: 20.-24. lipnja, 15.-19. srpnja i 27.-31. srpnja. To su redom periodi od četvrtka do nedjelje za koje se može zaključiti da koreliraju sa većim emisijama ozonskih prekurzora ( $NO_2$ , VOC) i epizodama ekstremnih ljetnih toplinskih valova.



Sl. 2.7 Dnevne prosječne koncentracije  $SO_2$  tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine

Pojačane koncentracije  $SO_2$  ističu se tijekom druge polovice lipnja i tijekom zadnja dva vikenda u mjesecu.

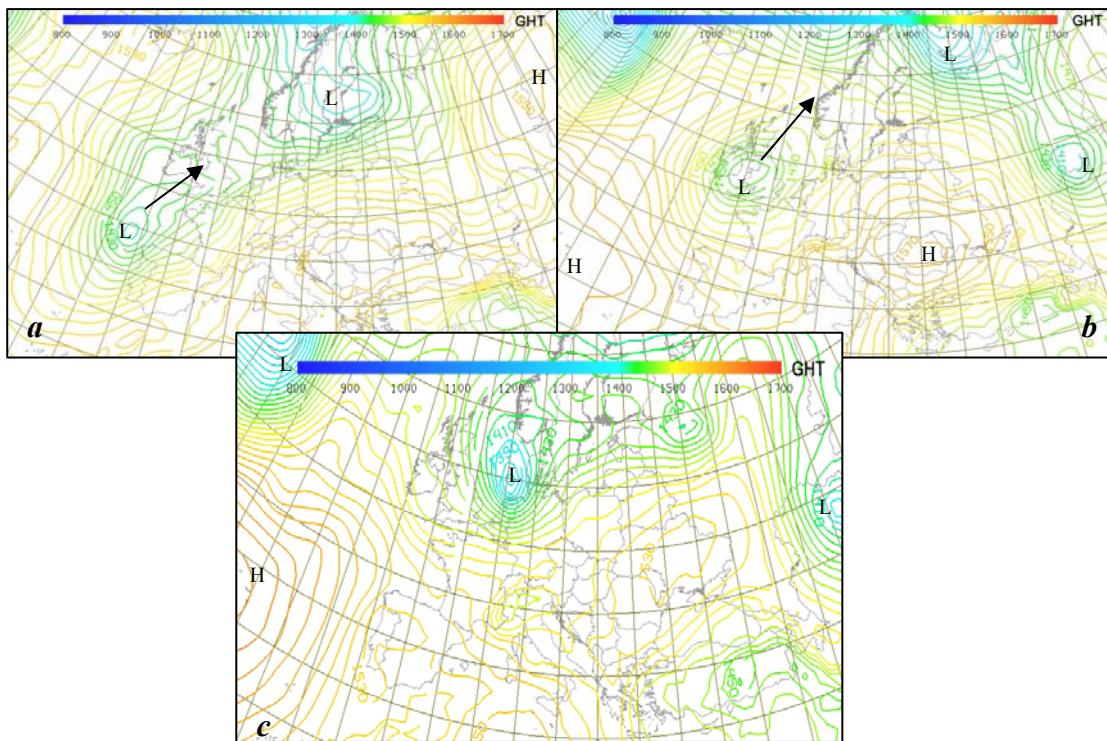
Odabrane mjerene onečišćujuće tvari pokazuju povišene koncentracije za različite vremenske epizode, a posebno međusobno koreliraju tijekom perioda od 27. do 31. srpnja 2005. godine.



Sl. 2.8 Konturni prikaz ekstremnih temperatura u 12UTC 31. srpnja 2005.

Periodi s povišenim koncentracijama onečišćavala zraka često su uzrokovani meteorološkim uvjetima na različitim prostornim skalama. Najznačajniji vremenski uvjeti koji prate dugotrajno povišenje koncentracija su zasigurno polja niskog gradijenta tlaka te epizode s ekstremnim godišnjim temperaturama zraka (Sl. 2.8). Sinoptička polja visokog i niskog tlaka s izrazitim gradijentima uzrokuju vertikalno (konvektivno) miješanje te bolju horizontalnu disperziju onečišćujućih tvari. Takva polja tlaka nastaju nasred oceana ili većih vodenih površina (Slika 2.9). Prikazane geopotencijalne visine izobara od 850hPa te izobare od 500 i 750 hPa standardizirani su pokazateljji sinoptičkih polja tlakova.

Područje sjevernog Jadrana te cijeli Mediteran odlikuju razrijedene konturne linije što ukazuje na slab ili nikakav gradijent tlaka, glavnu odliku stabilnog atmosferskog stanja.



Slika 2.9 Visinske karte 850hPa izobare tijekom tri podneva:  
a) 27. 7. 2005., b) 29. 7. 2005., c) 31. 7. 2005. (izvor NCEP GFS prognoze)

Takvo stanje utječe na slabu disperziju onečišćujuće tvari i na njihovo sve veće nakupljanje nad takvim područjima.

Na temelju prikazanih sinoptičkih meteoroloških uvjeta moguće je zaključiti kako je period između srijede 27. i nedjelje 31. srpnja 2005. godine izrazito fotokemijski aktivni period s obzirom na povišene temperature (sunčev zračenje) nad cijelim kopnenim dijelom Europe te da je za promatrano područje sjevernog Jadrana tijekom cijelog perioda dijagnosticirano stabilno atmosfersko stanje. Time je promatrani period zadovoljio sve postavljene kriterije te će se za taj period provesti simulacija evaluacije sustava za modeliranje kakvoće zraka MM5-SMOKE-CMAQ.

### 3 METEOROLOŠKO MODELIRANJE

#### 3.1 UVOD

Prvi dio sustava za modeliranje kakvoće zraka sastoji se u pripremi meteoroloških varijabli stanja zraka koje će se koristiti kao ulazni podaci za pripremu emisija, upotrebom SMOKE sustava za procesiranje emisija, te izravno kao ulazni podatak za kemijski transportni model CMAQ. S obzirom da je cilj ovog rada evaluacija regionalne i lokalne kakvoće zraka, koja je, pored sinoptičkih, uvjetovana  $\beta$ - i  $\gamma$ -mezoskalnim fenomenima, koristit će se mezoskalni meteorološki model koji udovoljava potrebnu rezoluciju CMAQ modela kakvoće zraka. Osim što prognostički mezoskalni model osigurava uvid u lokalne pojave (prostorna skala od nekoliko kilometara), koje direktno utječu na disperziju emisija iz prizemnih izvora onečišćenja zraka, takav model posjeduje najsličnija prognostička polja dobivena rezultira prognostičkim poljima najbližim onima iz operativnih sinoptičkih numeričkih prognostičkih modela poput GFS, JMA, ECMWRF, itd. Prognostički nehidrostatski mezoskalni model MM5 potpuno udovoljava zahtjevima većine modela kakvoće zraka te je odabran za meteorološko modeliranje odabrane epizode.

#### 3.2 MM5 - sustav za meteorološko mezoskalno modeliranje

MM5 je mezoskalni<sup>14</sup> meteorološki model pete generacije, originalno razvijen u suradnji PSU<sup>15</sup> i UCAR<sup>16</sup> (*Grell, Dudhia, Stauffer, 1995*) te namijenjen simuliranju (predviđanju) atmosferske cirkulacije nekog budućeg atmosferskog stanja uz poznavanje pripadnog početnog atmosferskog stanja. Primjenjuje se prilikom predviđanja lokalne prognoze vremena, ali se često koristi i kao predprocesorski model, tj. kao model za pripremu početnih meteoroloških podataka (tlaka, temperature, relativne vlažnosti, ...) kao ulaznih podataka za modele kakvoće zraka. Odlikuje ga niz posebnosti zbog kojih se izdvaja od drugih mezoskalnih modela:

- sposobnost ugnježđivanja (*nesting*) više računskih domena – omogućuje usitnjenje, adaptaciju s obzirom na interesna područja;
- nehidrostatska dinamika – omogućuje finu horizontalnu rezoluciju modela do 1 km te modeliranje vertikalne difuzije i konvekcije;
- mogućnost izvođenja proračuna sekvencijalnim i paralelnim načinom na računalima s dijeljenom i distribuiranom memorijom;
- mogućnost izbora niza fizikalnih modela i njihovih numeričkih shema s obzirom na specifičnost simulacije (specifične eksplisitne relacije vlažnosti zraka, procesa u graničnom planetarnom sloju, radijacije, konvektivne parametrizacije);
- mogućnost prilagodbe modela mjerenim podacima, tkz. četiridimenzionalna prilagodba podataka.

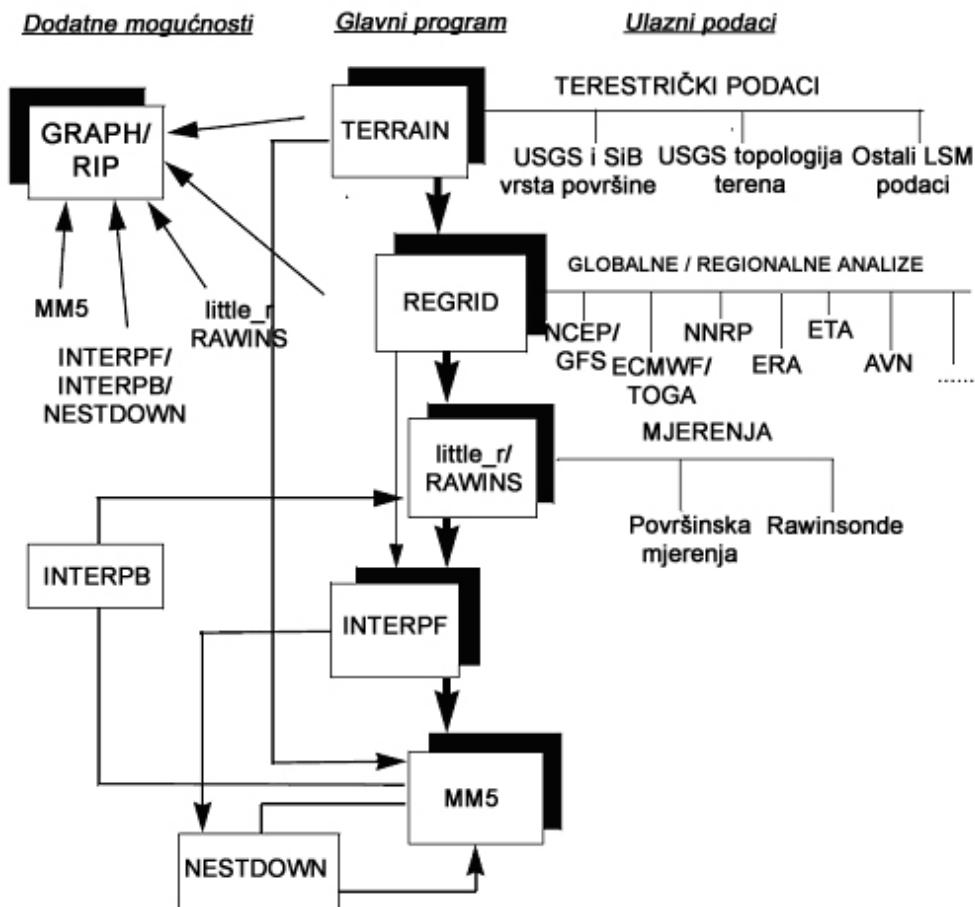
Model je podržan s nekoliko predprocesorskih i postprocesorskih programa koji zajedno čine MM5 modelirajući sustav. Shematski dijagram na Sl. 3.1 prikazuje dijagram tijek MM5 sustava za modeliranje kao i tijek ulaznih podataka. S obzirom na gore navedene posebnosti sustava, mogućnost podešavanja raznih parametara, te korištenje ili nekorištenje pojedinih

<sup>14</sup> obuhvaća atmosferske procese na prostornoj skali od 1 do 1000 km

<sup>15</sup> PSU - Pennsylvania State University

<sup>16</sup> UCAR – University Corporation for Atmospheric Research

modula sustava, ostvarena je na fleksibilan način tako da se svaki modul pokreće zasebno. Svi su moduli uglavnom pisani u Fortran programskom jeziku te portabilni na sve Unix bazirane platforme (Unix Compaq/Alpha, Cray, DEC, HP, IBM, SGI, Sun i PC sa Linuxom). Korisniku je omogućeno prilagođavanje sustava svojim potrebama što je u svrhu ovog istraživanja napravljeno na par razina upotrebom unix bash skripti. Opis načina na koji je korišten modelirajući sustav MM5 prikazan je kroz svaki od korištenih modula sustava.



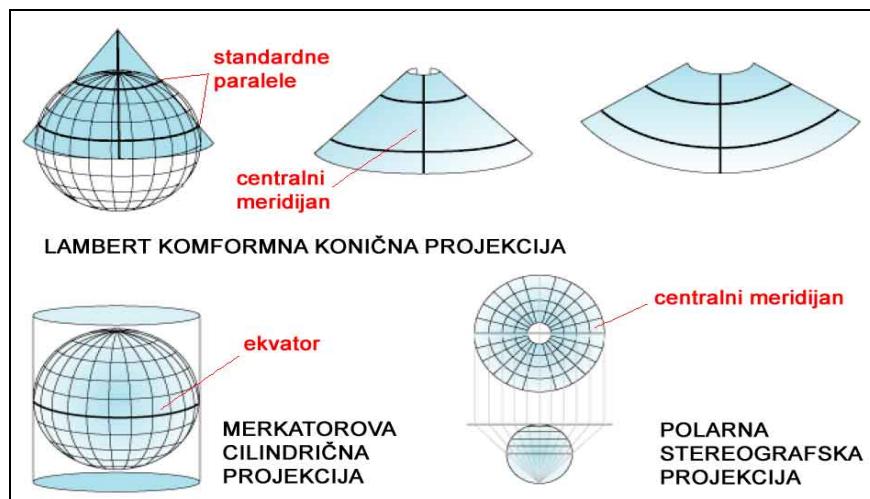
Sl. 3.1 Dijagram tijeka sustava MM5

### 3.2.1 Definiranje simulacijskih domena (*TERRAIN*)

TERRAIN je program s kojim započinje svaka simulacija u MM5 sustavu za modeliranje. Ovim programom se priprema numerička mreža za svaku računsku domenu te se za njih definiraju statički podaci potrebni za meteorološki model MM5 te modele kakvoće zraka. S obzirom na činjenicu da je MM5 kutijasti model na početku je potrebno odrediti horizontalnu mezoskalnu mrežu centralno smještenu u ishodištu koordinatnog sustava kartografske projekcije pogodne za geografsku širinu promatranog područja. Među dostupnim projekcijama su (Sl. 3.2):

- Merkatorova cilindrična projekcija pogodna za domene u tropskom ekvatorijalnom području do 30-tog stupnja sjeverne i južne geografske širine,

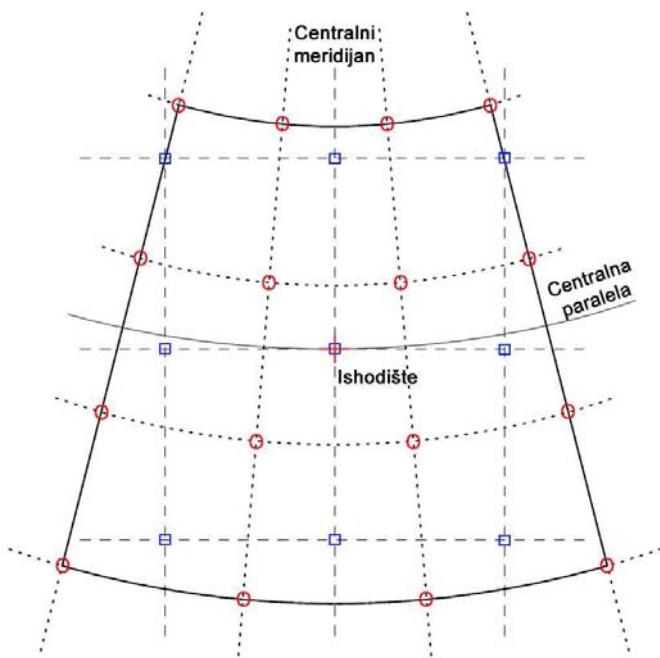
- *Lambert-konformna konična sekantna projekcija* pogodna za domene u umjerenom pojasu između  $30^{\circ}$  i  $60^{\circ}$  te
- *polarna stereografska projekcija* pogodna za domene u polarnom pojasu.



Sl. 3.2 MM5 podržane kartografske projekcije

Horizontalna rezolucija, veličina i broj ugniježđenih domena su osnovni parametri koje je u ovom koraku potrebno definirati. Ovi parametri se određuju na temelju iskustava dosadašnjih istraživanja, meteoroloških aspekata, aspekata modela za procjenu kakvoće zraka te u odnosu na dostupnost ulaznih podataka i osigurani računalni kapacitet. Posebno je važno naglasiti sposobnost ugnježđivanja domena finijih rezolucija u, prema veličini, veće domene grubljih dimenzija. Tim principom moguća je adaptacija u određena područja domene kako bi se finijim rezolucijama omogućilo simuliranje lokalnih i mezoskalnih meteoroloških fenomena. Finije domene koriste (za rubne uvjete i za inicijalizaciju) podatke iz svojih "majčinskih" domena (one-way nesting). Veće domene također mogu biti korigirane iz podataka s finijih domena (two-way nesting).

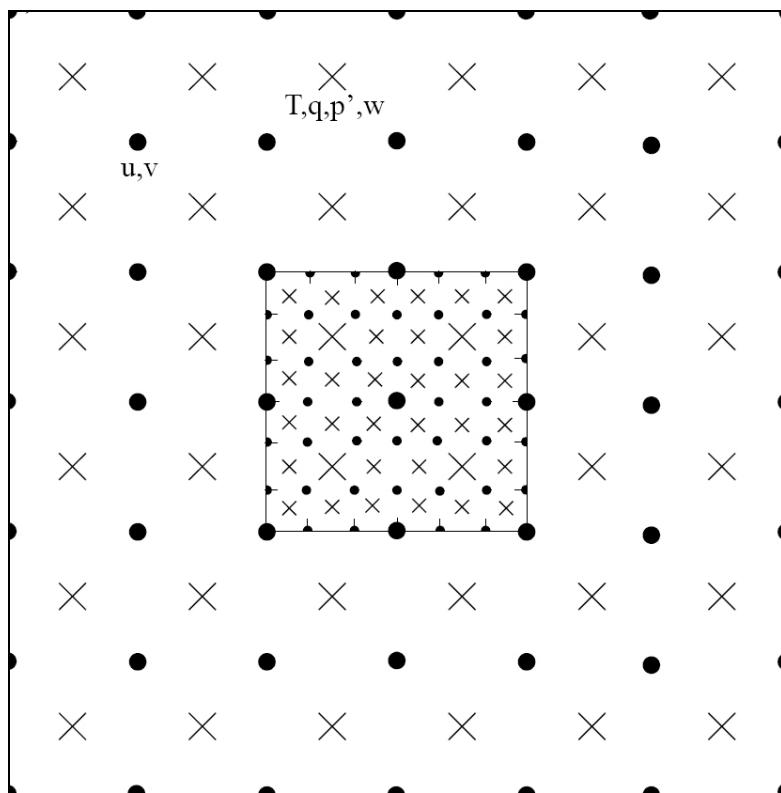
Druga važna zadaća TERRAIN potprograma je da za svaki čvor numeričke domene horizontalno interpolira podatke o topografiji terena, iskoristivosti, sastavu i vrsti pokrova tla preuzetih iz USGS-ovih baza podataka. Program također izračunava neke dodatne konstantne parametre poput geografske širine i dužine, kartografskog faktora te Coriolisov parametar za sve čvorove domena.



Sl. 3.3 Isječak računske mezoskalne domene (plavi čvorovi) i mreže meridijana i paralela u okolišu ishodišta domene. Istaknutih 16 presjecišta meridijana i paralela (crveni čvorovi) predstavljaju mrežu za dvodimenzionalnu paraboličku interpolaciju statičkih podataka na čvorove mezoskalne računske domene.

### 3.2.2 Procesiranje globalnih meteoroloških polja (REGRID)

Program REGRID predstavlja drugi korak u dijagramu tijeka MM5 sustava. Nakon pripremljenih računskih domena REGRID čita arhivirane meteorološke analize ili produkte globalnih meteoroloških prognoza na izobarnim vertikalnim nivoima za svaki vremenski korak te za cijeli vremenski period promatrane epizode. Program može učitavati setove podataka (meteoroloških analiza) u tzv. GRIB i ne-GRIB formatima koji su tradicionalno dostupni MM5 korisnicima na internetskim stranicama. Postoje različiti tipovi arhiviranih analitičkih i prognostičkih polja: NCEP GDAS, NCEP/NCAR, NCEP/ETA, ECMWF, MRF/AVN od kojih je tradicionalno najprihvaćenija NCEP GDAS horizontalne rezolucije  $1^\circ \times 1^\circ$  i vertikalne 50hPa. Učitani podaci nalaze se u geografskim koordinatama te se po učitavanju bilinearno interpoliraju na horizontalnu mrežu najveće računske domene koristeći odabranu kartografsku projekciju. Pri horizontalnoj interpolaciji vektora brzine koristi se Arakawa-B mreža s pomaknutim *križnim* čvorovima za pola horizontalnog koraka mreže u odnosu na ostale skalarne veličine (*točkasti* čvorovi) u punom horizontalnom koraku.



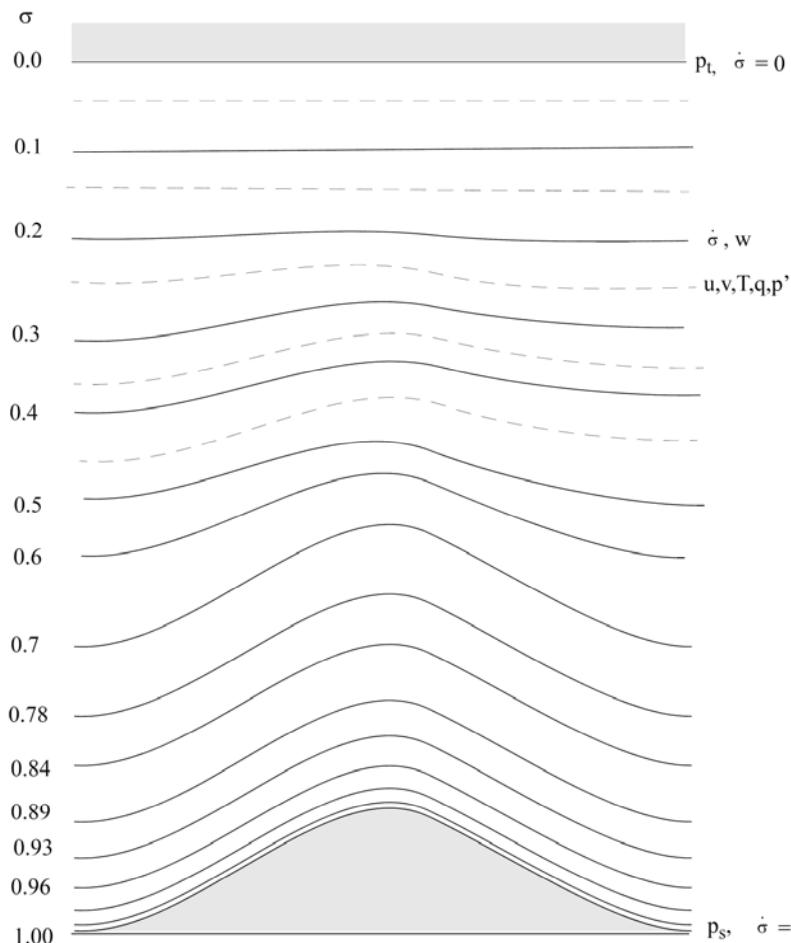
Sl. 3.4 Prikaz Arakawa-B numeričke mreže na rjedoj i finoj  
ugnjiježđenoj računskoj domeni

### 3.2.3 Definiranje inicijalnih i rubnih uvjeta (INTERPF)

INTERPF je potprogram koji dohvaća horizontalno interpolirana meteorološka polja i vertikalno ih interpolira (linearna interpolacija) iz originalnih hidrostatskih tlačnih nivoa na nehidrostatske tlačne, teren prateće, sigma ( $\sigma$ ) nivoje.  $\sigma$ -koordinate predstavljaju bezdimenzijsku vertikalnu tlačnu koordinatu MM5 modela

$$\sigma = \frac{(p - p_t)}{(p_s - p_t)} \quad (3.1)$$

gdje je  $p$  referentni tlak,  $p_t$  odabrani konstantni tlak gornje granice računske domene (gornjeg rubnog uvjeta), a  $p_s$  površinski tlak. Prema jednadžbi (3.1) vidljivo je da  $\sigma$  poprima vrijednost nula ( $\sigma = 0$ ) na vrhu domene te jedan na površini terena ( $\sigma = 1$ ) te da  $\sigma$  nivoi pri dnu domene prate topografiju terena dok su pri vrhu domene nivoi skoro paralelni. Kao i kod horizontalne interpolacije tako i vertikalna interpolacija slijedi Arakawa-B pomak za pola koraka mreže pri interpolaciji vektora brzine u odnosu na ostale skalare. INTERPF zatim priprema rubne i inicijalne uvjete za MM5 model. S obzirom na nehidrostatsku prirodu MM5 modela (vidi sljedeći naslov), u ovom koraku određuju se varijable početnog stanja (konstantni površinski tlak  $p_o$  i temperatura  $T_o$ , vertikalni profil temperature te referentni i perturbirani tlak kako bi se uspostavila hidrostatska ravnoteža na rubovima domene. Za razliku od mezoskalnih modela većina velikih operativnih numeričkih prognostičkih modela bazira se na hidrostatskoj aproksimaciji koja zanemaruje vertikalna kretanja zraka, odnosno propagaciju gravitacijskih valova. Modificirana jednadžba kontinuiteta služi za određivanje vertikalne komponente brzine tek kao dijagnosticirane veličine. Zbog velike razlike između vertikalne i horizontalne rezolucije takvi modeli produciraju šum dijagnosticiranom vertikalnom kretanjem, odnosno omogućuju propagaciju nerealnih gravitacijskih valova. INTERPF uklanja taj šum korigirajući brzinu iz učitanih polja pomoću vertikalno osrednjene vrijednosti divergencija komponenti brzina.



**Sl. 3.5 Vertikalna MM5 koordinata: Teren prateća sigma ( $\sigma$ ) koordinata.  
Pune linije označavaju pune  $\sigma$  nivoe dok crtkane linije označavaju polovične  $\sigma$  nivoe.**

### 3.2.4 Nehidrostatski meteorološki mezoskalni model (MM5)

MM5 je numerički dio modelirajućeg sustava namijenjen prognozi atmosferskog stanja. Baziran je na primitivnim fizikalnim jednadžbama za očuvanje mase, količine gibanja, energije te vlažnosti. Veličine stanja su maseno osrednjene vrijednosti temperature, specifične vlažnosti, komponenata brzine i tlaka od kojih su temperatura, gustoća i tlak, s obzirom na nehidrostatski karakter MM5 modela, definirani putem referentne vrijednosti baznog početnog stanja i perturbacije referentnog stanja.

#### 3.2.4.1 Jednadžbe MM5 meteorološkog modela

Jednadžbe su detaljno opisane kod (*Grell i sur. 1994.*) dok je u nastavku prikazan njihov sažeti oblik, a cjelokupni izvod prikazan u prilogu B. Jednadžbe koje slijede definirane su za nehidrostatski model koji pored hidrostatskog dijela osnovnih veličina referentnog stanja posjeduje i perturbaciju tih veličina u odnosu na referentno stanje, kao što slijedi:

$$p(x, y, z, t) = p_0(z) + p'(x, y, z, t) \quad (3.2)$$

$$T(x, y, z, t) = T_0(z) + T'(x, y, z, t) \quad (3.3)$$

$$\rho(x, y, z, t) = \rho_0(z) + \rho'(x, y, z, t) \quad (3.4)$$

Referentne veličine tlaka proizlaze iz hidrostatske aproksimacije  $p_0(z) = -\rho g z$ , dok vertikalni temperaturni profil predstavlja dijabatska analitička funkcija stanja atmosfere ili mjerjenjima fitirani srednji troposferski temperaturni profil.

Vertikalna  $\sigma$ -koordinata je potpuno definirana putem referentnog tlaka

$$\sigma = \frac{p_0 - p_t}{p_s - p_t} \quad (3.5)$$

gdje su  $p_s$  i  $p_t$  tlakovi na površini i na vrhu domene s obzirom na referentni tlak te neovisni o vremenu. Totalni tlak je prema tome

$$p = p^* \sigma + p_t + p' \quad (3.6)$$

gdje je  $p^*(x, y) = p_s(x, y) - p_t$ . Prikazani perturbirani tlak  $p'$  je prognozirana veličina.

Jednadžba za modeliranje perturbiranog tlaka izvodi se na temelju jednadžbe stanja, jednadžbe kontinuiteta i prvog zakona termodinamike te se raspisuje izrazom za totalni tlak iz (3.6). Jednadžbe gibanja izvedene su na temelju jednadžbi (B.33), a koristeći transformaciju iz Kartezijevog u  $\sigma$ -koordinatni sustav  $(x, y, z) \rightarrow (x, y, \sigma)$  (*Dudhia, 1993.*).

*Tlačna jednadžba*

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla p' = \gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} - \rho_0 g w + \frac{\gamma p}{T} \left( \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (3.7)$$

*Jednadžbe horizontalne količine gibanja*

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla u = \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) + v \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - lw \cos \alpha - \frac{uw}{r_{zemlje}} + D_u \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla v = \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) + u \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - lw \sin \alpha - \frac{vw}{r_{zemlje}} + D_v \quad (3.9)$$

*Jednadžba vertikalne količine gibanja*

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla w = -\frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma} \frac{p'}{p} + g \frac{p_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + l(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{zemlje}} + D_w \quad (3.10)$$

Termodinamička jednadžba proizlazi iz prvog zakona termodinamike i jednadžbe stanja te je u spremi sa tlačnom jednadžbom.

*Termodinamička jednadžba*

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p' - p_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (3.11)$$

Pomoćni izrazi i objašnjenje pojedinih članova prikazanih jednadžbi dan je slijedom:

- advekcijski izraz  $\mathbf{v} \cdot \nabla A \equiv mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma}$
- vertikalna brzina  $\dot{\sigma} = -\frac{p_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v$
- divergencijski izraz  $\nabla \cdot \mathbf{v} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{m} \right) - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{p_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma}$
- kartografski (projektivni) faktor  $m = \frac{\text{udaljenost na MM 5 mreži}}{\text{stvarna udaljenost na Zemlji}}$
- Coriolisovi parametri  $l = 2\Omega \cos \varphi$ ,  $f = 2\Omega \sin \varphi$ ,  $\varphi$  - geografska širina
- geografske koordinate  $\alpha = \lambda - \lambda_c$   
 $\lambda$  - geografija dužina  
 $\lambda_c$  - središnja geografija dužina područja nad kojim se vrši simuliranje
- izrazi  $u \frac{\partial m}{\partial y}$ ,  $v \frac{\partial m}{\partial x}$  i  $r_{zemlje}$  su već spomenuta tkz. *metrička ubrzanja* (efekti zakrivljenosti) koji nastaju uslijed prijelaza sa sfernog u stereografski koordinatni sustav
- $D_u$ ,  $D_v$ ,  $D_w$  predstavljaju vertikalne i horizontalne difuzivne članove te vertikalno miješanje zbog turbulentnosti planetarnog graničnog sloja

- $\dot{Q}$  predstavlja dijabatsko grijanje uslijed promjena faza, tj. evaporacije i kondenzacije, uslijed radijacije te ostalih izvora topline.
- $D_\theta$  predstavlja toplinsku difuziju uslijed provođenja topline, difuzije više sudionika u sustavu te viskozne disipacije (trenja)

Jednadžba za perturbirani dio mezoskalnog tlaka (3.7) proizlazi iz opće plinske jednadžbe, potpune nekompresibilne jednadžbe kontinuiteta i prvog termodinamičkog zakona. Ostale jednadžbe predstavljaju jednadžbe očuvanja količine gibanja (3.8)-(3.10) i energije (3.11).

Eksplisitne transportne jednadžbe za udio vodene pare  $q_v$ , vode u oblacima (leda)  $q_c$  i kišne vode (snijega)  $q_r$  sa pripadnim mikrofizikalnim procesima (Dudhia, 1999.) su:

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial u q_v / m}{\partial x} + \frac{\partial v q_v / m}{\partial y} \right] - \frac{\partial q_v \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - P_{RE} - P_{CON} - P_{II} - P_{ID} + D_{qv}, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial u q_c / m}{\partial x} + \frac{\partial v q_c / m}{\partial y} \right] - \frac{\partial q_c \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + P_{ID} + P_{II} - P_{RC} - P_{RA} + P_{CON} + D_{qv}, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = -m^2 \left[ \frac{\partial u q_r / m}{\partial x} + \frac{\partial v q_r / m}{\partial y} \right] - \frac{\partial q_r \dot{\sigma}}{\partial \sigma} - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{V_f \rho g q_r}{p^*} \right) + (P_{RE} + P_{RC} + P_{RA}) + D_{qr}, \quad (3.14)$$

respektivno, gdje su

$P_{CON}$  - kondenzacija (smrzavanje za  $T < 0$  °C) vodene pare u oblak (led) pri zasićenju,  
 $P_{RA}$  – prirast oblaka zbog kiše (leda zbog snijega),  
 $P_{RC}$  – konverzija oblaka zbog kiše (leda zbog snijega),  
 $P_{RE}$  – evaporacija (sublimacija) kiše (snijega),  
 $P_{II}$  – proces inicijacije kristala leda,  
 $P_{ID}$  – proces depozicije (sublimacije) kristala leda,  
 $V_f$  – brzina kišnih kapi ili snijega

### 3.2.4.2 Diskretizacija jednadžbi MM5 meteorološkog modela

Jednadžbe su diskretizirane metodom konačnih razlika u Arakawa-B pomaknutu mrežu. Svi advekcijski članovi prostorno su diskretizirani centralnom shemom drugog reda dok se za vremensku diskretizaciju primjenjuje više eksplisitnih shema ovisno o vremenskom koraku. Većina članova sa desne strane jednadžbi (advekcijski, Coriolisov i uzgonski član) koristi leapfrog shemu, difuzivni član forward step shemu, a neke radijacijske veličine su konstantne duži period te se ažuriraju svakih 30 minuta proračuna. Članovi s lijeve strane jednadžbi u, v,

$w$ ,  $p'$  odgovorni su za nastanak horizontalnih zvučnih valova te ih je potrebno ažurirati češće koristeći *split-eksplicitnu* shemu kratkih vremenskih koraka (četvrtina koraka *leapfrog* sheme). Implicitna shema koristi se za vremensku diskretizaciju vertikalnog difuzivnog člana.

Bočne granice velike domene modela koriste linearnu relaksaciju prognoziranih kao i perturbiranih veličina prema mjerjenjima kroz četiri rubna čvora. Ugnježđene domene koriste vrijednosti veće domene pri specificiranju prognoziranih i perturbiranih veličina prva dva granična čvora. Vertikalna brzina jedina je prognoziran veličina koja za granične vrijednosti koristi *Neumann*-ov granični uvjet (uvjet nultog gradijenta).

Za gornju granicu svih domena koristi se *gornji radijacijski granični uvjet*. Prema Klemp i Durran (1983) gornji radijacijski granični uvjet omogućuje internim težinskim valovima da nereflektirani propagiraju u stratosferu.

Donju granicu domene predstavlja topografija terena. Temperatura se određuje na temelju srednjih dnevnih ili dnevnih varijacija temperature koristeći mjerjenja (najgrublja domena), te iz *petoslojnog modela tla* (ugnježđene domene) koji, koristeći jednadžbu vertikalne difuzije, izračunava temperaturu u pet slojeva zemlje (na dubini od 1, 2, 4, 8 i 16 cm) s fiksnom podlogom. Temperatura morske površine izračunava se kao temperatura na najdoljnjoj izobarnoj plohi od 1000 hPa.

S obzirom na preporuke iz detaljnih analiza parametrizacija fizikalnih procesa u MM5 modelu provedenih nad područjem kompleksne topografije (*Jorba i sur. 2003.*) i (*Pineda i sur. 2004.*) korištene su sljedeće sheme:

Za parametrizaciju planetarnog graničnog sloja koristi se MRF<sup>17</sup> (*Medium Range Forecast*) shema (*Otte, 1999.*), preuzeta iz NCEP<sup>18</sup>/MRF numeričkog prognostičnog programa (*Hong i Pan 1996.*), jer je pogodna za domene visoke rezolucije. Bazirana je na Troen-Mahrt-ovoj verziji kontra-gradijentnog člana i profilu turbulentne difuzivnosti K u dobro izmiješanom plantarnom graničnom sloju.

Za parametrizaciju oblaka koristi se Grell-ova konvektivna shema pogodna za malene domene. Bazirana je na shemi jednog oblaka s fluksevima uspona i pada te kompenziranog kretanja zraka proračunatih na temelju vertikalnog profila grijanja i ovlaživanja.

Eksplicitna shema vlažnosti *Simple Ice* (*Dudhia, 1989.*) odabrana je jer omogućuje predviđanje oblačnosti, padalina i leda kroz mikrofizikalne procese putem eksplicitnih jednadžbi udjela vodene pare, vode u oblacima i kišne vode u zraku. Posjeduje funkcionalno ograničenje pri razini smrzavanja. Jednadžbe su prikazane u Prilogu C.

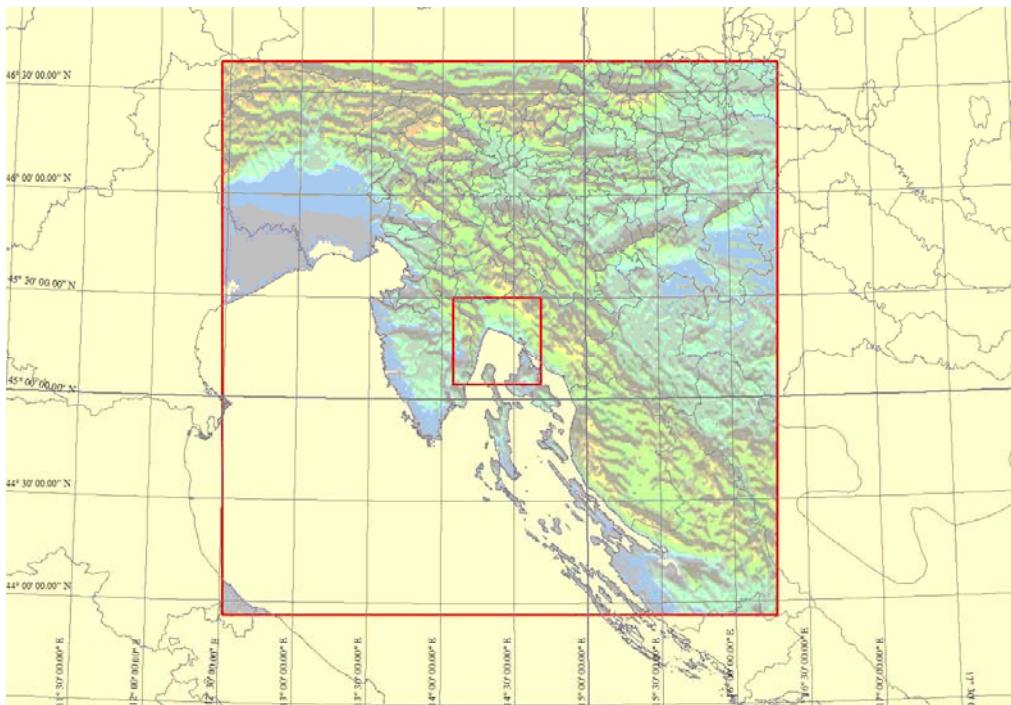
Oblačna radijacijska shema (*Dudhia, 1989.*) omogućuje interakciju kratkovalnog i dugovalnog zračenja s oblacima i čistim nebom te izračunava površinski radijacijski fluks.

<sup>17</sup> MRF - Medium Range Forecast

<sup>18</sup> NCEP – National Centers for Environmental Prediction

### 3.3 Definiranje računskih mezoskalnih domena

Riječki zaljev je centralno smješten na  $14^{\circ}24'$  geografske dužine prema Greenwichu te između  $45^{\circ}$  i  $46^{\circ}$  sjeverne geografske širine. Stoga je<sup>19</sup> za transformaciju ulaznih podataka s geografskog ( $\lambda, \phi, p$ ) na koordinatni sustav računske domene ( $x, y, \sigma$ ) odabrana Lambertova-konformna konična sekantna projekcija.



Sl. 3.6 Prikaz rubnih granica dviju MM5 računskih domena D1 i D2, s rezolucijom 3km i 1 km.

Koristeći princip ugniježđenosti (*nesting*) domena, odabrane su dvije kvadratne domene za simulaciju odabrane epizode nad Riječkim zaljevom čije su karakteristike prikazane sljedećom tablicom:

Tab. 3.1 Karakteristike računskih domena

Domena	Skraćeni naziv	Horizontalna rezolucija	Veličina domene	Geografska širina i dužina središta domene
Domena 1	D1	3 km	300 km	$45^{\circ} 18' / 14^{\circ} 24'$
Domena 2	D2	1 km	50 km	$45^{\circ} 18' / 14^{\circ} 24'$

Domena D1 je grublje rezolucije koraka mreže 3 km te pokriva veći dio sjevernog Jadrana, Liku, Gorski Kotar, Istru, Sloveniju, dio Italije i Austrije veličinom  $300 \times 300 \text{ km}^2$ . Rezolucija odabranih GFS/NCEP globalnih meteoroloških polja za inicijalizaciju i postavke rubnih uvjeta je  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  što na  $45^{\circ}$  geografske širine predstavlja mrežu  $60 \times 90 \text{ km}$  te zadovoljava minimalne uvjete za linearnu i kvadratnu interpolaciju meteoroloških veličina na mrežu računske domene D1. Tu tvrdnju potkrepljuje i analiza horizontalne rezolucije domene prikazana u nastavku (3.4.1.). Domena D2 je ugniježđena domena u domenu D1 te ima finiju horizontalnu rezoluciju od 1 km. Pokriva područje Riječkog zaljeva veličine  $50 \times 50 \text{ km}^2$  što je primarno područje interesa za modeliranje kakvoće zraka s obzirom da nad tim područjem postoje mjerjenja onečišćenja te detaljniji podaci o antropogenim emisijama.

<sup>19</sup> Koordinatne linije Lambertove-konformne sekantne projekcije sijeku se pod pravim kutem te pri interpolaciji osiguravaju neznatno odstupanje u rasponu između projektivnih sekanti na  $30^{\circ}$ -toj i  $60^{\circ}$ -toj geografskoj širini.

**Tab. 3.2 Raspodjela vertikalnih  $\sigma$ -koordinata za računske domene D1 i D2**

Red. Broj	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Ref. Tlak	hPa	1000	998	990	975	960	935	905	865	825	780	725	665	600	530	455	375	290	195	100
$\sigma$	-	1	0.998	0.989	0.974	0.953	0.926	0.892	0.852	0.806	0.753	0.694	0.629	0.558	0.480	0.396	0.306	0.210	0.107	0
Visina	m	0	7.5	43	120	240	405	620	885	1200	1600	2100	2600	3300	4100	5100	6300	8000	10200	13800

Računske domene prostiru se visinski kroz  $\sigma$ -slojeve (Tab. 3.2) od visine terena gdje su slojevi gušći (7 slojeva unutar prvih 1000m) do gornje granice domene koja je postavljena na 100 hPa (kraj tropopauze na visini nešto manjoj od 14km), za promatrani epizodni period, a gdje su slojevi rjeđi s razmakom od čak  $\Delta p_{top} = 100\text{hPa}$ .

### 3.4 Rezultati provedenih simulacija i numeričkih eksperimenata

Za svaki dan epizode i za odabrane referentne računske domene provedena je 24-satna simulacija MM5 modelom. Kako bi se utvrdilo da odabrane računske domene i njihove značajke zadovoljavaju određene uvjete, utvrdila optimalna rezolucija i veličina domene te, s obzirom na odabrani položaj domene D2, pokazala neosjetljivost na perturbaciju graničnih uvjeta domene D1, izvršen je niz numeričkih eksperimenata. Usporedba se temeljila na odnosu konturnih polja površinske temperature i strujnica vjetra te vertikalnih profila modeliranih i satelitskih polja temperature i vjetrova.

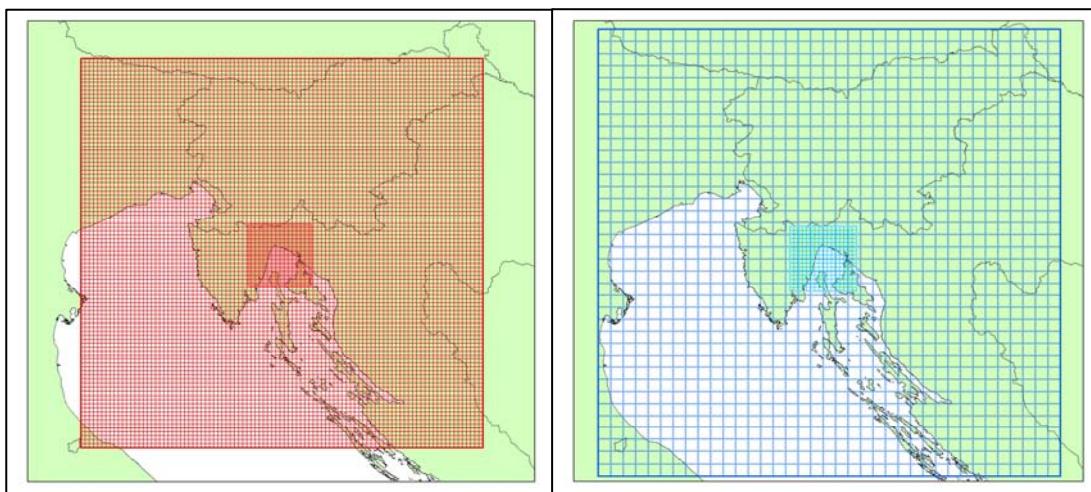
Pri inicijalizaciji modela i podešavanju graničnih uvjeta računskih domena koriste se prognostička polja dobivena iz GFS/NCEP globalnog prognostičkog sustava koji producira prognoze svakih 6 sati. To je ujedno i period prikupljanja satelitskih podataka za inicijalizaciju GFS-a i sličnih globalnih ili sinoptičkih modela. Jedna takva prognoza obuhvaća period od 360 sati (15-dnevna prognoza), a podaci se dostavljaju svaka 3 sata. U svrhu ovog istraživanja korištena su prognostička polja s inicijalizacijom GFS-a u ponoć (0000UTC) za svaki dan epizode te za sljedeća 24 sata (Sl. 3.7). GFS datoteke sadrže globalna sinoptička polja prognoziranih meteoroloških varijabli, a u nazivu svakog od njih se očituje na koji način je pojedino polje inicijalizirano i koji prognozirani sat pojedina datoteka predstavlja. Prema tome „gfs.t06z.pgrbf03“ označava da se prognoza u ovoj datoteci odnosi na prognozu trećeg sata (-f03) od inicijalnog šestog sata (-t06) što u realnom vremenu znači 09UTC. Na temelju prikazanih graničnih uvjeta provedene su MM5 simulacije.

Kako bismo ocijenili kvalitetu meteoroloških polja MM5 simulacije, izvršena je usporedba modeliranih vrijednosti sa satelitskim, inicijalnim, sinoptičkim poljima za 0600UTC (gfs.t06z.pgrbf00), 1200UTC (gfs.t12z.pgrbf00) i 1800UTC (gfs.t18z.pgrbf00) sukladno Sl. 3.7 gdje su polja odabranih vremena istaknuta narančastom, zelenom i ljubičastom bojom, respektivno. Simulacije su provedene za referentni dan 30. srpnja 2005. koji odražava sredinu epizode odabrane za evaluaciju modela kakvoće zraka.

Inicijalizacija GFS/NCEP sustava (svakih 6 sati)										
Datum	Sat	29.07.2005. - 00	29.07.2005. - 06	29.07.2005. - 12	29.07.2005. - 18	30.07.2005. - 00	30.07.2005. - 06	30.07.2005. - 12	30.07.2005. - 18	31.07.2005. - 00
29.07.2005.	0	<b>gfs.t00z.pgrbf00</b>								
	3	gfs.t00z.pgrbf03								
	6	gfs.t00z.pgrbf06	<b>gfs.t06z.pgrbf00</b>							
	9	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t06z.pgrbf03							
	12	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t06z.pgrbf06	<b>gfs.t12z.pgrbf00</b>						
	15	gfs.t00z.pgrbf15	gfs.t06z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03						
	18	gfs.t00z.pgrbf18	gfs.t06z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	<b>gfs.t18z.pgrbf00</b>					
	21	gfs.t00z.pgrbf21	gfs.t06z.pgrbf15	gfs.t12z.pgrbf09	gfs.t18z.pgrbf03					
	0	gfs.t00z.pgrbf24	gfs.t06z.pgrbf18	gfs.t12z.pgrbf12	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf00</b>				
	3		gfs.t06z.pgrbf21	gfs.t12z.pgrbf15	gfs.t18z.pgrbf09	gfs.t00z.pgrbf03				
30.07.2005.	6	gfs.t06z.pgrbf24	gfs.t12z.pgrbf18	gfs.t18z.pgrbf12	gfs.t00z.pgrbf06	<b>gfs.t06z.pgrbf00</b>				
	9		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t06z.pgrbf03				
	12		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t06z.pgrbf06	<b>gfs.t12z.pgrbf00</b>			
	15		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t06z.pgrbf03				
	18		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	<b>gfs.t18z.pgrbf00</b>			
	21		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf21	gfs.t00z.pgrbf15	gfs.t12z.pgrbf09	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf00</b>		
	0		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf12	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf00</b>		
	3		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf03</b>		
	6		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf06</b>		
	9		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf09</b>		
31.07.2005.	12		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf06</b>		
	15		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf03</b>		
	18		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf06</b>		
	21		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf21	gfs.t00z.pgrbf15	gfs.t12z.pgrbf09	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf03</b>		
	0		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf12	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf06</b>		
	3		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf03</b>		
	6		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf06</b>		
	9		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf09</b>		
	12		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf12</b>		
	15		gfs.t12z.pgrbf21	gfs.t18z.pgrbf15	gfs.t00z.pgrbf09	gfs.t12z.pgrbf03	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf15</b>		
	18		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf06	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf18</b>		
	21		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf21	gfs.t00z.pgrbf15	gfs.t12z.pgrbf09	gfs.t18z.pgrbf03	<b>gfs.t00z.pgrbf21</b>		
	0		gfs.t12z.pgrbf24	gfs.t18z.pgrbf18	gfs.t00z.pgrbf12	gfs.t12z.pgrbf12	gfs.t18z.pgrbf06	<b>gfs.t00z.pgrbf24</b>		

Sl. 3.7 Prikaz inicijalizacija **gfs.t00z.pgrbf00** (crveno) i proizvedenih prognoza **gfs.t00z.pgrbfXX** ( $XX=03,06,09,\dots,357,360$ ) GFS globalnih sinoptičkih modela. GFS prognoze koriste se za početne i granične uvjete MM5 simulacija.

### 3.4.1 Analiza horizontalne rezolucije domena

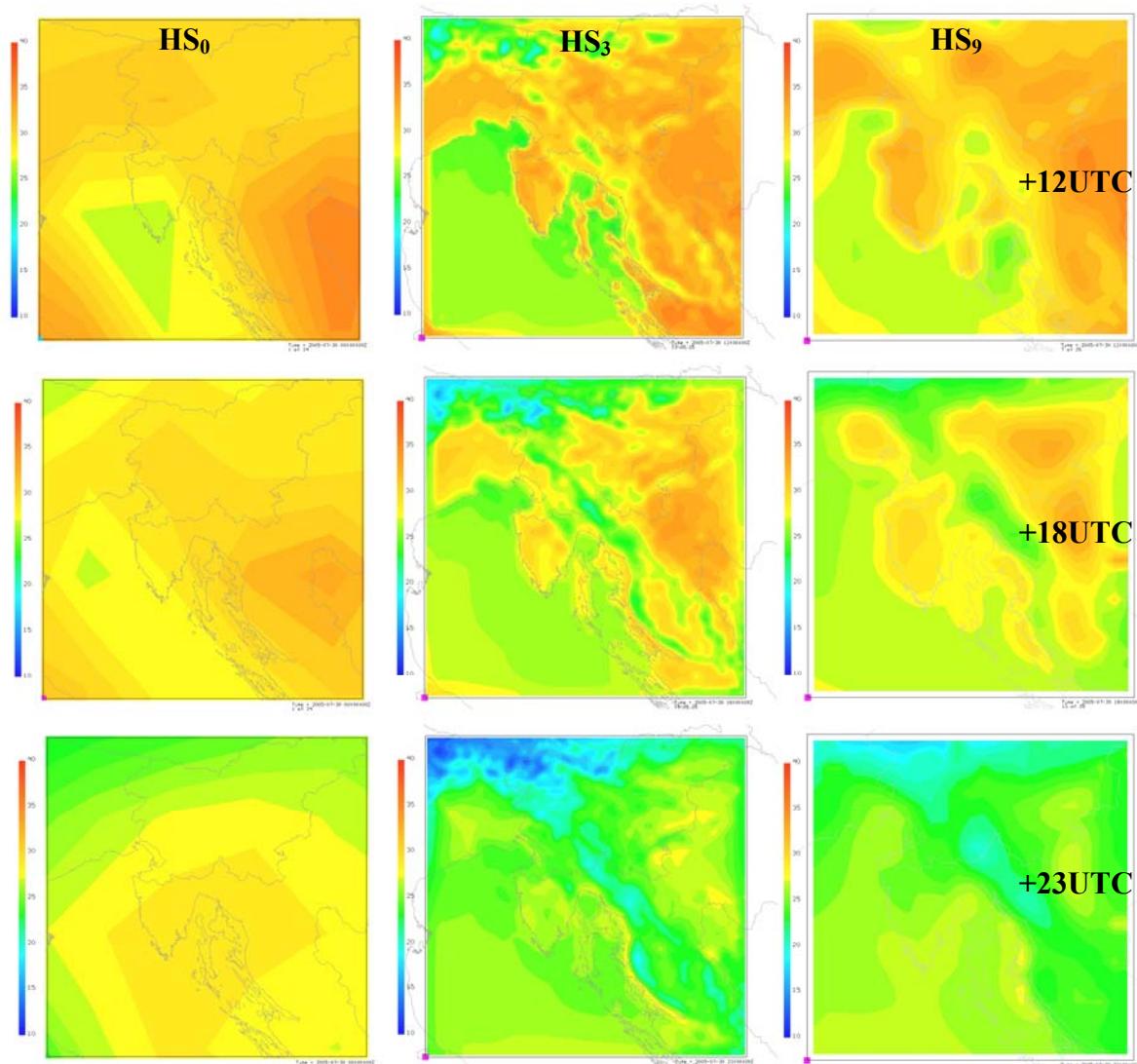


Slika 3.8 Prikaz numeričkih mreža domena D1 i D2 za slučaj horizontalnog koraka mreže 3km x 1km (lijevo, crveno) i koraka 9km x 3km (desno, plavo)

Numeričke domene većih rezolucija, bilo vertikalne ili horizontalne, u većini slučajeva postižu kvalitetnije rezultate što se očituje u boljoj razlučivosti efekata na manjim skalamama. To je izrazito bitno kod meteorološkog modeliranja na lokalnoj i mazoskalnoj razini gdje se meteorološki fenomeni pojavljuju na razini ili pod razinom numeričke mreže. Povećanje rezolucije numeričke mreže danas predstavlja trend u svim područjima znanosti koji se temelje na numeričkim simulacijama mehanike kontinuuma te prema tome i u polju meteorologije. Tome doprinosi sve veća dostupnost snažnih računala. Međutim, meteorološke pojave i procesi vezani uz atmosferu su izrazito nestacionarnog karaktera. Prema tome meteorološki modeli veće prostorne rezolucije zahtijevaju i rubne uvjete odgovarajuće veće vremenske rezolucije. Ulagana prognostička polja iz GFS/NCEP modela imaju vremenski korak od 3 sata što omogućuje korištenje prostorne rezolucije od 4-15km (Thunis, 2001.).

Sukladno preporukama odabrane su dvije horizontalne rezolucije domena D1 i D2, prva s korakom 3kmx1km (u dalnjem tekstu HS<sub>3</sub>) te druga s korakom 9kmx3km (u dalnjem tekstu HS<sub>9</sub>) (Slika 3.8). Korištenjem ugniježđenih domena D2 omogućeno je ažuriranje

meteoroloških veličina na čvorovima domene D1 koji presijecaju domenu D2. Prema tome dovoljno je analizirati i međusobno usporediti rezultate dobivene simulacijama sa GFS inicijalnim satelitskim poljima nad domenom D1.



**Slika 3.9 Konturni prikaz temperaturama na 1000hPa-noj geopotencijalnoj plohi za simulacije provedene na domenama sa horizontalnom rezolucijom od 3kmx1km (druga kolona) i 9kmx3km (treća kolona) za referentni +06UTC 30.07.2006. Usporedba je dana sa tri sljedeće satelitske GFS inicijalizacije (prva kolona) redom +12UTC, +18UTC i +24UTC.**

Usporedba je dana kroz horizontalne i vertikalne raspodjele temperatura i amplituda brzine te strujnica vjetra na geopotencijalnoj plohi od 1000hPa za tri GFS inicijalizacije, +12UTC, +18UTC i +24UTC na temelju satelitskih meteoroloških podataka.

Na Slika 3.9 prikazana je usporedba satelitskih podataka s MM5 simulacijama za tri vremenska trenutka na referentni dan epizode 30.07.2005. godine. U objema simulacijama temperatura mora je tijekom dana relativno nepromjenjiva s obzirom da se more sporije hlađi i grije u odnosu na kopno u kojeg je uočljiv porast dnevne temperature te kontinentalno hlađenje tijekom noći (+24UTC). Usporedivost sa satelitskim podacima uočljiva je jedino u prostornom trendu viših i nižih temperatura s obzirom da su HS<sub>9</sub> i HS<sub>3</sub> visokorezolutne simulacije čije su površinske raspodjele temperatura pod snažnim utjecajem topologije, vrste tla (površinskog albeda) te polja brzina vjetrova. Stabilno anticiklonalno polje dominira nad

područjem domene D1 tijekom promatrane epizode i odabranog referentnog dana. To se posebno može vidjeti u konstantno povišenoj temperaturi u podvelebitskom kanalu čak i tijekom noćnih sati što ukazuje na oslabljenu horizontalnu advekciju. Analiza vertikalnih temperaturnih profila ukazuje na bolju usporedivost  $HS_9$  i  $HS_3$  simulacija sa  $HS_0$  pri većim sigma slojevima (Sl. 3.11) gdje je utjecaj topografije oslabljen te gdje ne postoji prijelaz kopna u more (kontinentalno kopneno područje i otvoreno more). Vertikalni presjeci dani su u pet geografskih položaja domene D1:

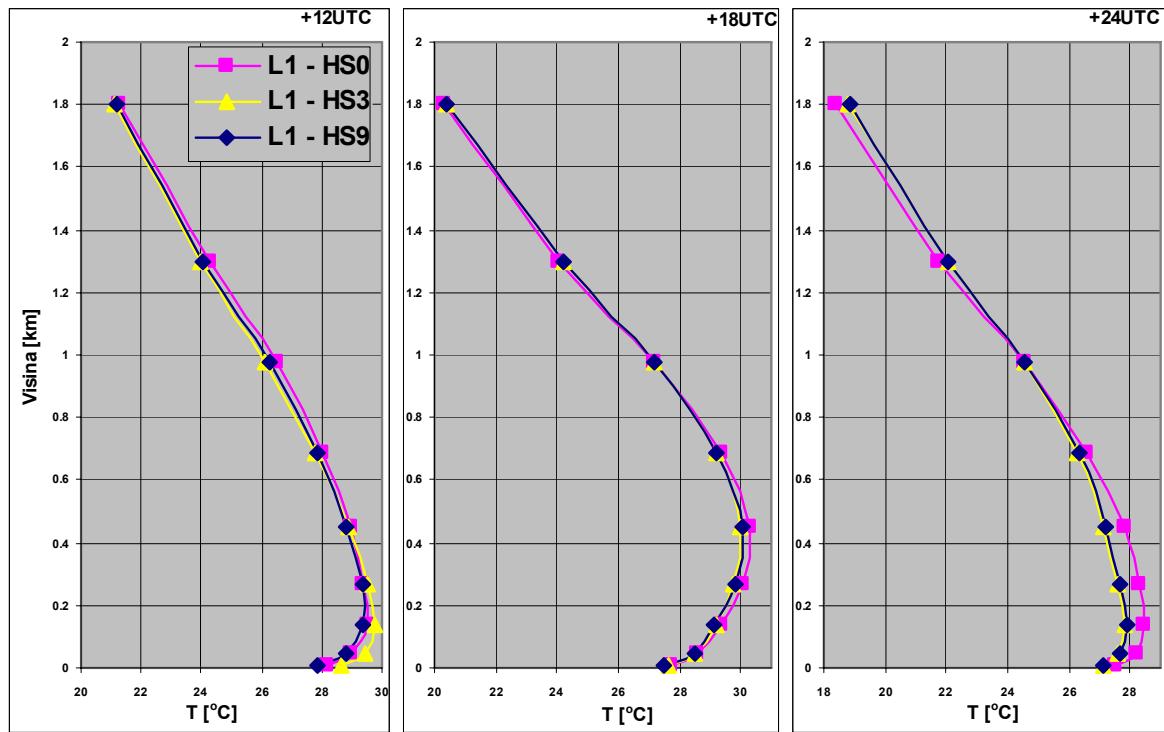


Sl. 3.10 Geografski prikaz testnih lokacija domene D1

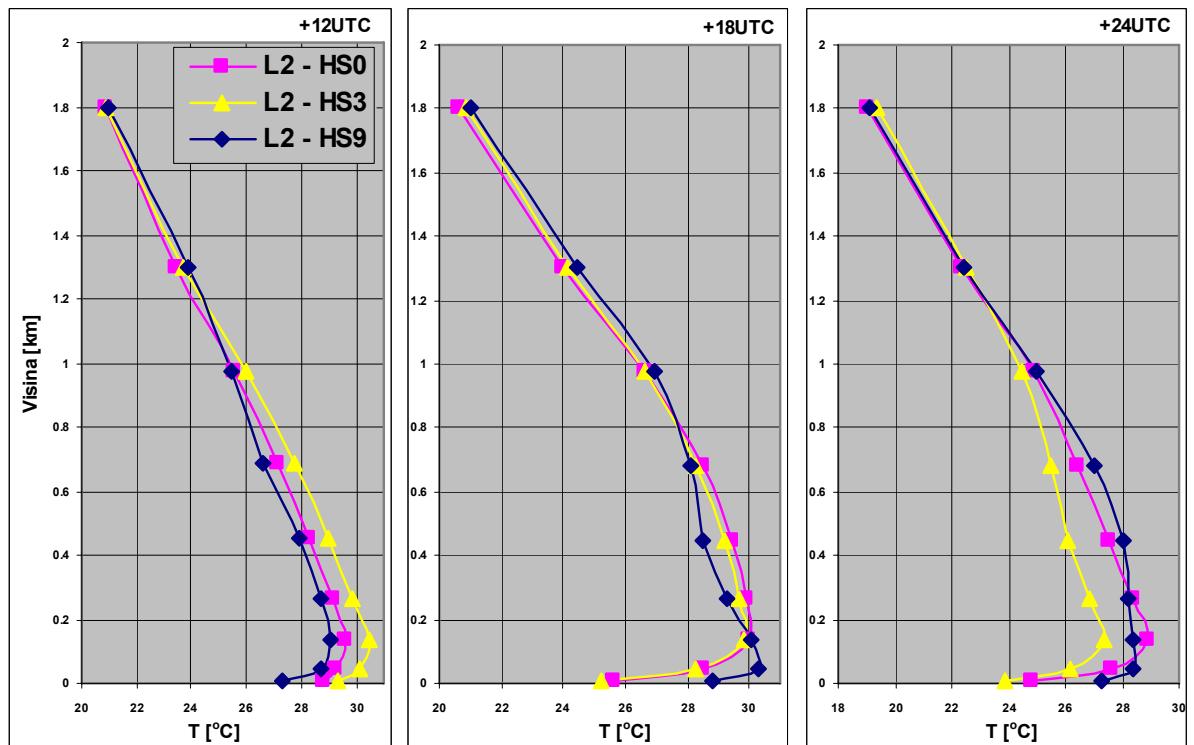
Tab. 3.3 Opis testnih lokacija domene D1

Naziv	Opis lokacije	G. širina	G. dužina
L1	sredina sjevernog Jadrana	44.50	13.30
L2	Riječki zaljev	45.25	14.40
L3	Delnice	45.30	15.10
L4	Senjski kanal	44.95	14.86
L5	Slovenija – Postojna	45.80	14.20

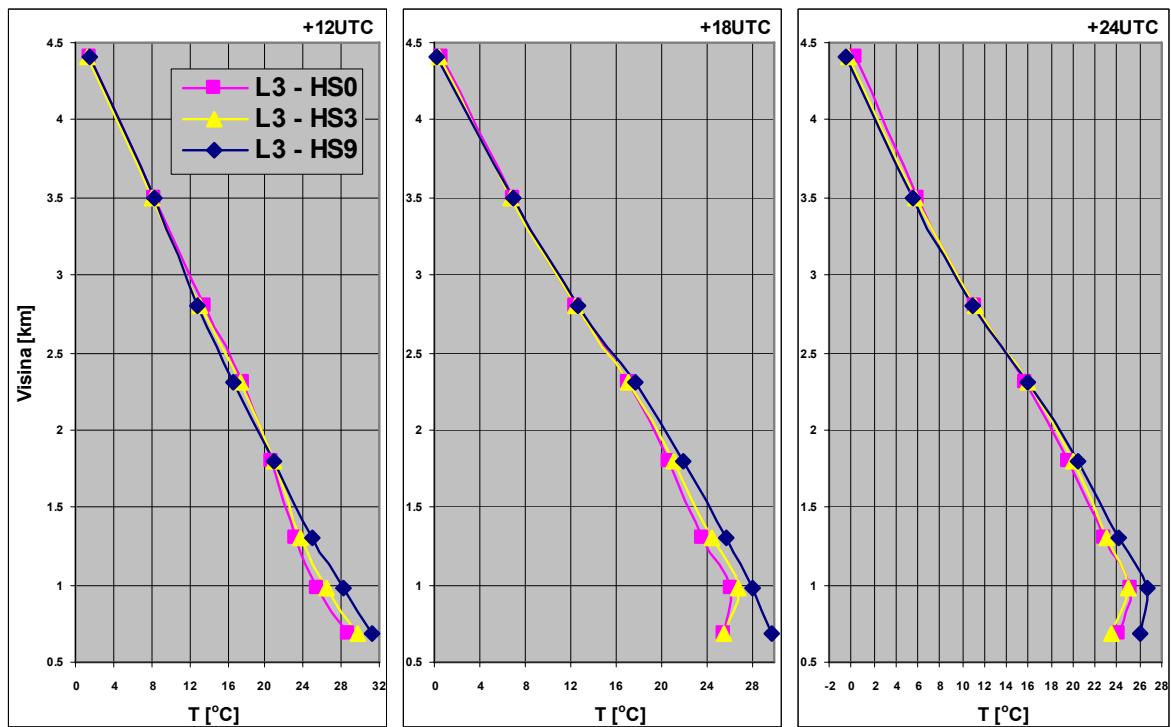
Lokacija L1 nalazi se na otvorenom sjevernom Jadranu gdje utjecaj kopna nije toliko očit te je podudarnost sa satelitskim podacima podjednaka i kod  $HS_3$  i  $HS_9$ . Isto je i s lokacijom L5 i djelomično L3 koje se nalaze u unutrašnjosti kopna. Razlika između temperaturnih profila  $HS_3$  i  $HS_9$  simulacija izražajnija je u području obalne i otočne razvedenosti (L2 i L4) sve do visine 850hPa plohe (1200m). Na svim lokacijama prisutna je temperaturna inverzija noćnog tipa (osim L5) koja se tijekom dana ne uspijeva uništiti osim kod lokacije L3 u Gorskem kotaru gdje se kopno brže zagrije tijekom dana.



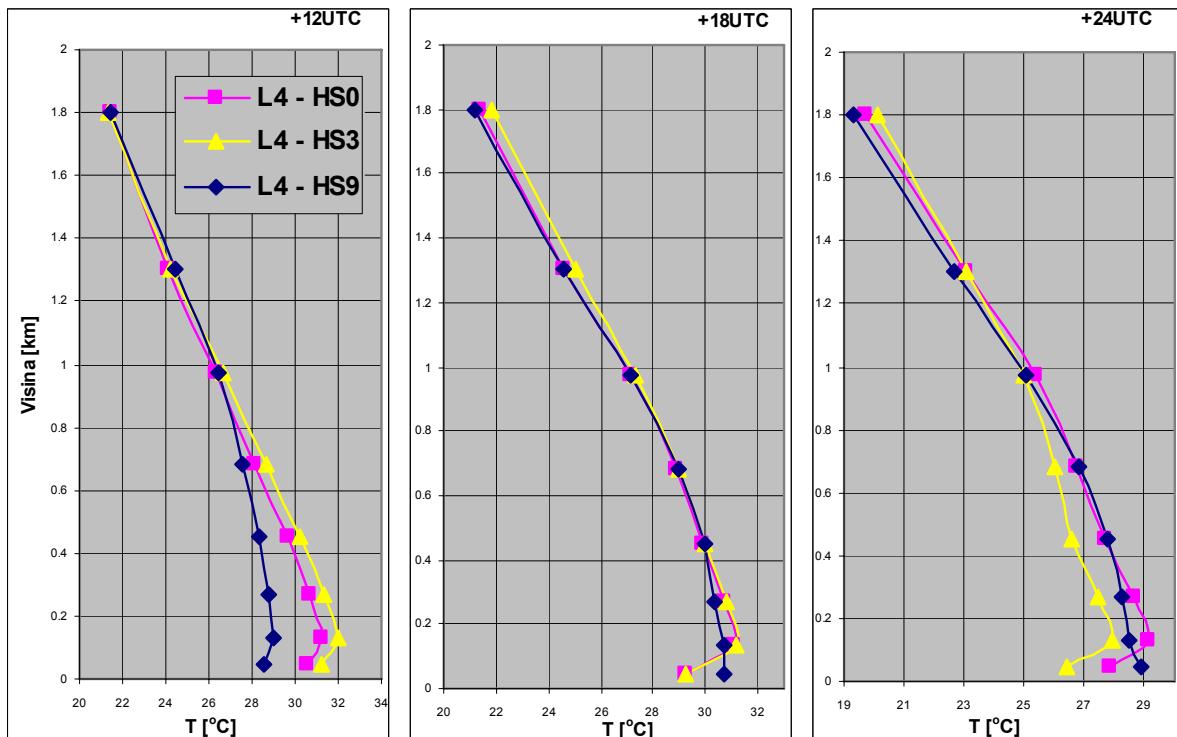
Sl. 3.11 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja  $HS_0$  i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene,  $HS_3$  i  $HS_9$ , respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC, +18UTC i +24UTC lokaciji L1 domene D1



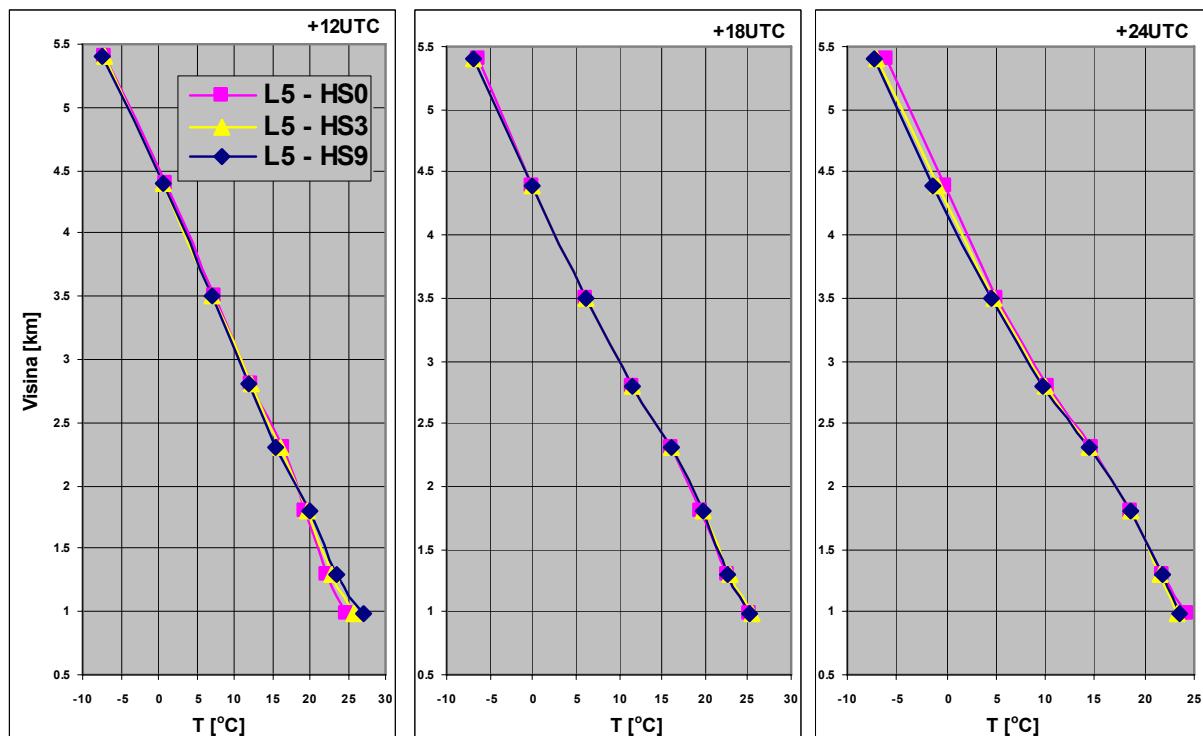
Sl. 3.12 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja  $HS_0$  i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene,  $HS_3$  i  $HS_9$ , respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC, +18UTC i +24UTC lokaciji L2 domene D1



Sl. 3.13 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja  $HS_0$  i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene,  $HS_3$  i  $HS_9$ , respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC, +18UTC i +24UTC lokaciji L3 domene D1



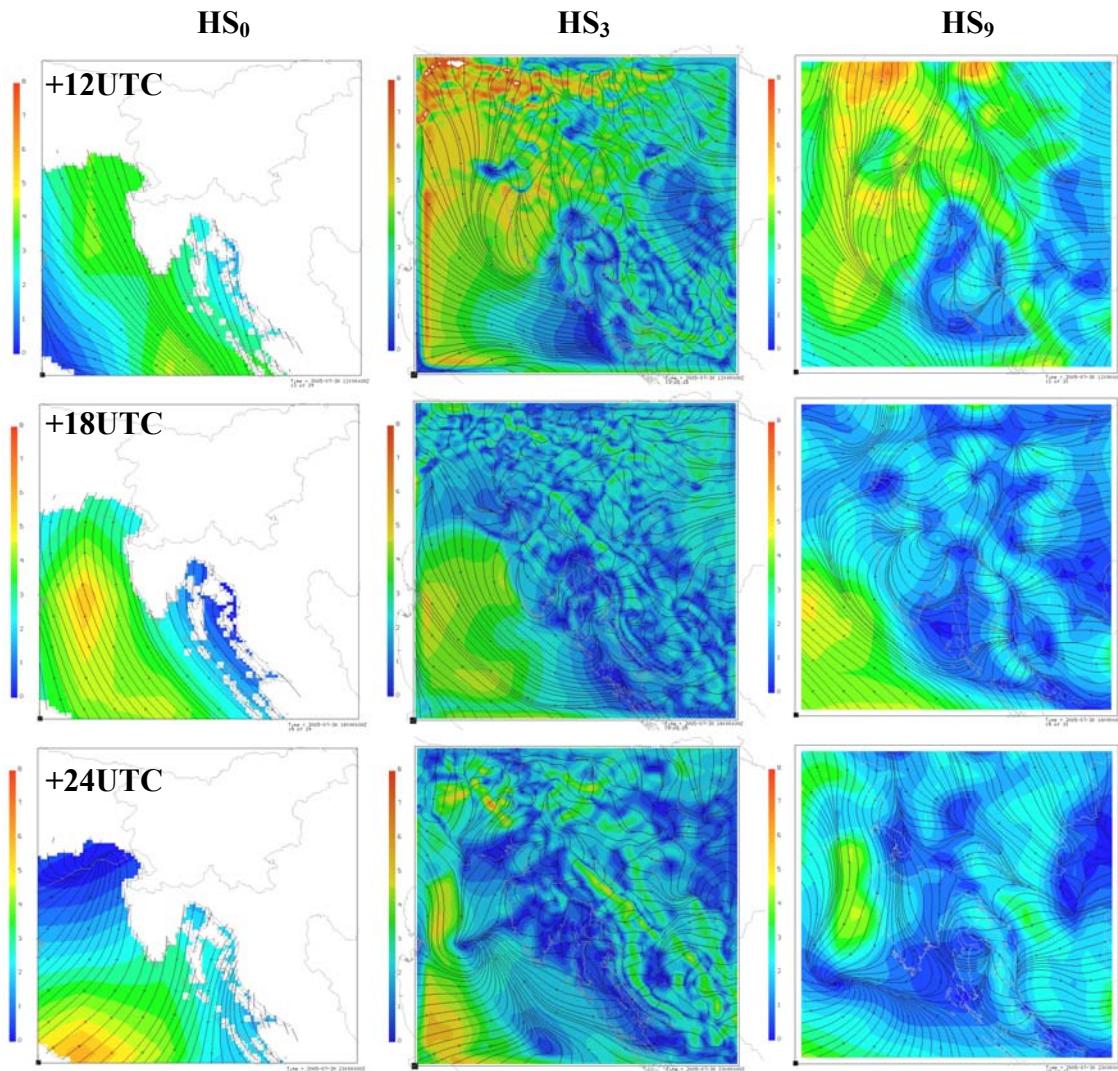
Sl. 3.14 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja  $HS_0$  i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene,  $HS_3$  i  $HS_9$ , respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC, +18UTC i +24UTC lokaciji L4 domene D1



Sl. 3.15 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja  $HS_0$  i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene,  $HS_3$  i  $HS_9$ , respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC, +18UTC i +24UTC lokaciji L5 domene D1

Slika 3.16 prikazuje usporedbu strujnica i amplituda brzine površinskog vjetra nad domenom D1. Podudarnost sa  $HS_0$  vidljiva je kod zadovoljavanja rubnih uvjeta te sa strujnicama i amplitudama nad otvorenim morem Sjevernog Jadrana. Amplitude i strujnice vjetra su u prostornoj skali koja se evaluirala (domena D2, isključivo pod utjecajem mezoskalnim i lokalnim fenomenima (lokalna terenska kanalizacija i obalna cirkulacija) te ih zbog različite horizontalne rezolucije nije moguće kvalitetno uspoređivati sa satelitskim podacima i međusobno  $HS_3$  i  $HS_9$ .

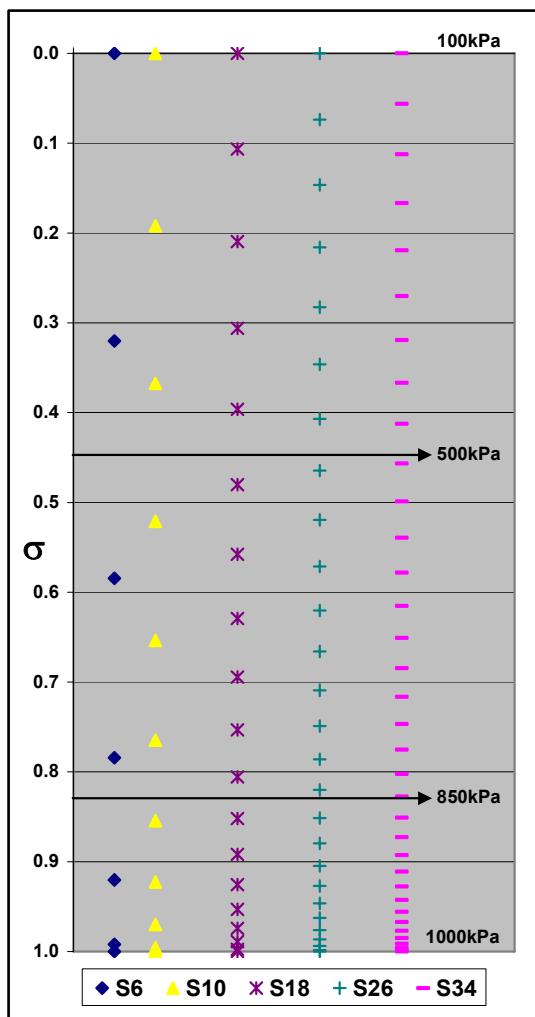
Prikazana analiza rezultata ukazuje na potrebu korištenja što većih horizontalnih rezolucija kako bi se što točnije reproducirala kopnena i otočna orografija kao pokretač konvektivnog i advektivnog kretanja zraka te time omogućio točniji opis lokalnih meteoroloških fenomena na promatranom području i stvorilo kvalitetnije rubne uvjete za modeliranje kakvoće zraka.



**Slika 3.16** Konturni prikaz amplitudne brzine i strujnica vjetra na 1000hPa-noj geopotencijalnoj plohi za simulačije provedene na domenama sa horizontalnom rezolucijom od 3kmx1km (*druga kolona*) i 9kmx3km (*treća kolona*) za referentni dan +06UTC 30.07.2006. Usporedba je dana za tri sljedeće satelitske GFS inicijalizacije (*prva kolona*) redom +12UTC, +18UTC i +24UTC.

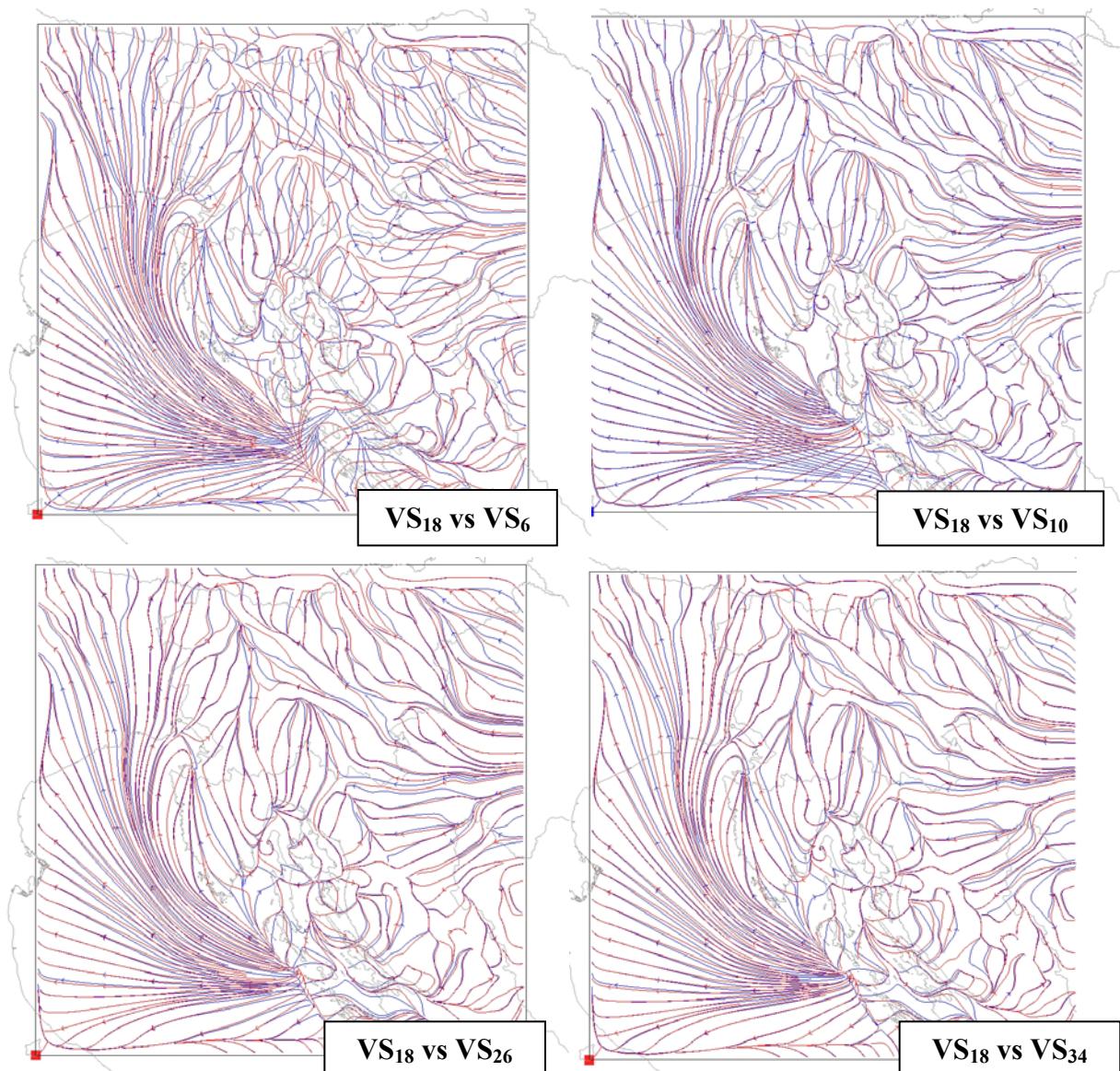
### 3.4.2 Analiza vertikalne rezolucije domena

Analizirano je pet vertikalnih raspodjela (Sl. 3.17) sigma slojeva pri horizontalnoj rezoluciji od 3x1 km za odabранe domene i referentni dan. To su simulacije sa 6, 10, 18, 26 i 34 sigma sloja (u nastavku VS<sub>6</sub>, VS<sub>10</sub>, VS<sub>18</sub>, VS<sub>26</sub> i VS<sub>34</sub>, respektivno). U svim provedenim simulacijama vertikalna mreža na sigma slojevima ugušćena je prema topografiji terena kako bi se što kvalitetnije modelirao atmosferski granični sloj i formiranje mezoskalnih meteoroloških fenomena u donjim dijelovima troposfere.



Sl. 3.17 Prikaz vertikalnog rasporeda sigma slojeva

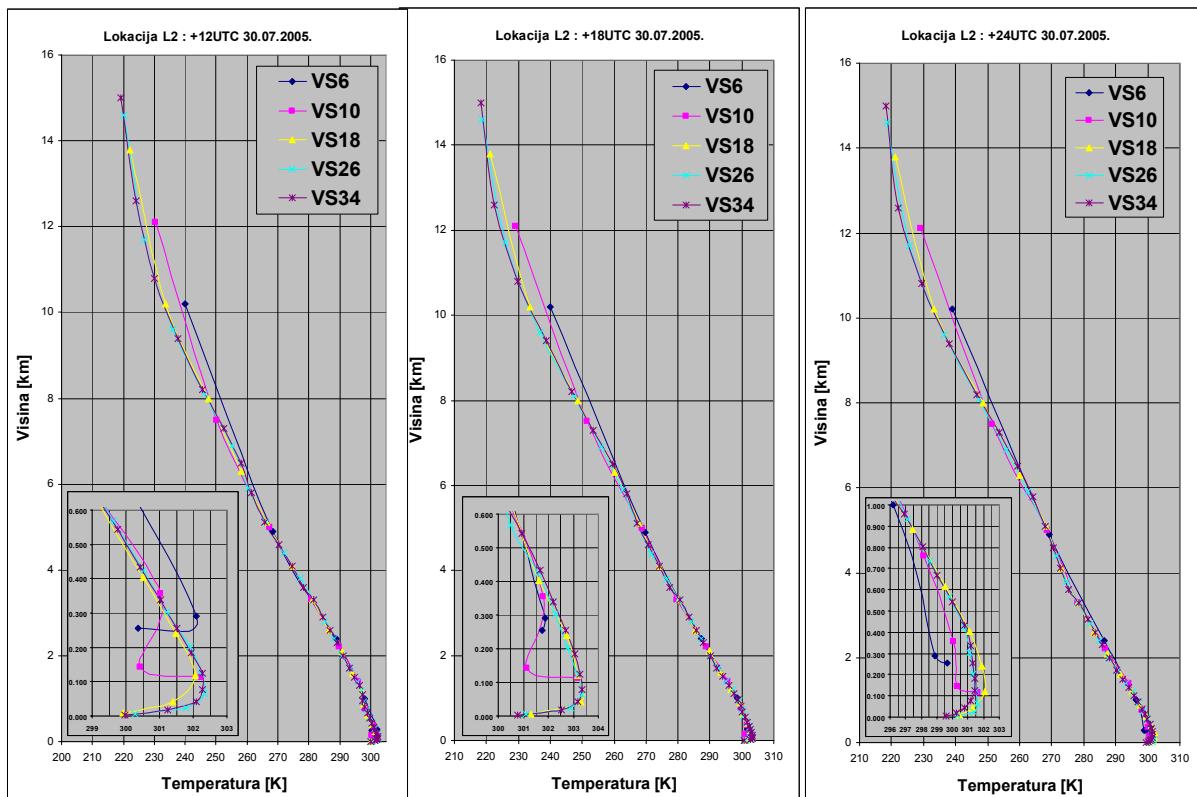
Analiza rezultata obuhvaća prikaz usporedbe horizontalnih strujnica na referentnom sigma sloju koji je jednak kod svih simulacija. VS<sub>18</sub> i HS<sub>3</sub> su identične simulacije te je s obzirom na njihovu usporedivost sa satelitskim meteorološkim poljima iz prethodno iznesene analize horizontalne rezolucije korištena kao referentna simulacija u odnosu na koju će se evaluirati rezultati usporedbe vertikalnih rezolucija. Izabran je reprezentativni trenutak +12UTC 30.07.2005. s obzirom da ostali vremenski trenuci prikazuju slične rezultate usporedbi simulacija. Prema Sl. 3.19 strujno polje kod VS<sub>6</sub> znatno se razlikuje od VS<sub>18</sub> osim pri odsustvu orografske na otvorenom moru gdje strujnice vjetra prate trend sukladno postavljenim rubnim uvjetima. Nadalje, može se zaključiti kako VS<sub>18</sub>, VS<sub>26</sub> i VS<sub>34</sub> ne postižu bolje rezultate nego VS<sub>10</sub> te je nepotrebno, visinski, dodatno ugušćavati računsku domenu sa stanovišta analize strujnog polja.



Slika 3.18 Horizontalni prikaz usporedbi strujnica vjetra simulacija VS<sub>6</sub>, VS<sub>10</sub>, VS<sub>26</sub> i VS<sub>34</sub> (plavo) sa referentnom simulacijom VS<sub>18</sub> (crveno) nad domenom D1 u +12UTC 30.07.2006. god.

Analiza vertikalnih profila temperaturnih polja presudna je u odabiru optimalnog broja sigma slojeva računske domene. Korištene su iste lokacije vertikalnih profila nad domenom D1 kao u slučaju analize horizontalne rezolucije (Sl. 3.10). Prikaz vertikalnih profila na svim pet lokacijama nije potreban, već je na Sl. 3.19 prikazan samo slučaj lokacije L2 s obzirom da odražava sredinu domene D2, koja je od primarnog interesa ovog rada, te da se odnosi vertikalnih profila temperatura na ostalim lokacijama ne razlikuju znatno od profila nad lokacijom L2. Na slici je vidljivo znatno odstupanje VS<sub>6</sub> i VS<sub>10</sub> simulacija do visine od 2000 m n.z. (*mali grafovi*) te na visinama većim od 6000 m n.z. gdje zbog nedovoljnog broja sigma nivoa nije uhvaćen prijelaz iz dijabatskog u izotermni oblik temperaturnog profila tropopauze primjetan kod VS<sub>18</sub>, VS<sub>26</sub> i VS<sub>34</sub>.

Sukladno prikazanim rezultatima odabrana je vertikalna raspodjela 18 sigma nivoa sukladno VS<sub>18</sub> testnoj simulaciji s obzirom da povećanje vertikalne rezolucije nije pokazalo bolje rezultate, a smanjenje degradiralo referentno stanje VS<sub>18</sub>.



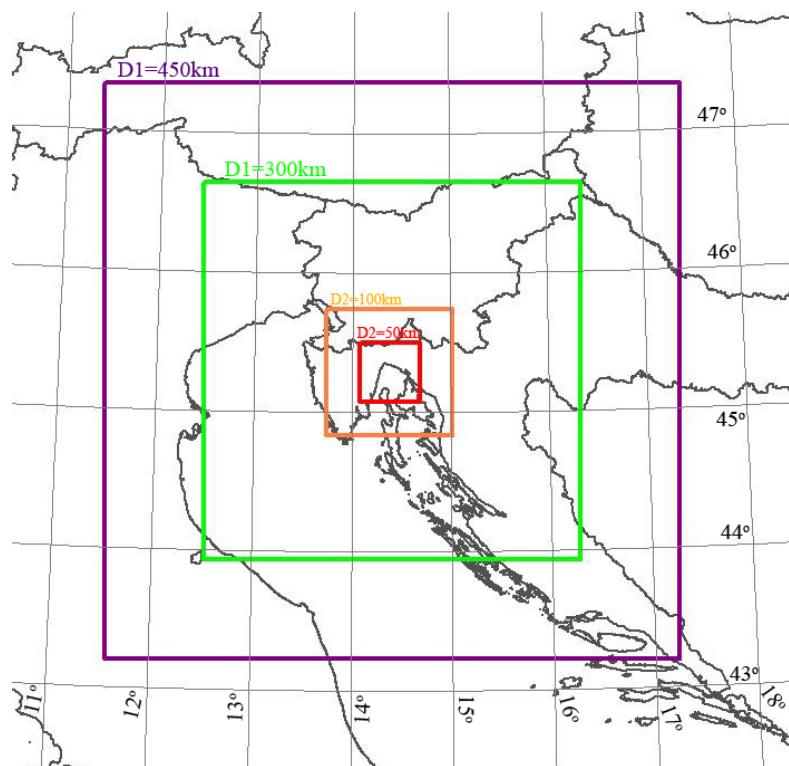
Sl. 3.19 Vertikalni profili temperaturu simulacija S6, S10, S18, S26 i S34 nad testnom lokacijom L2 za tri vremenska trenutka 30.07.2005.

### 3.4.3 Analiza veličine računskih domena

Satelitski meteorološki podaci definiraju granične i inicijalne uvjete za domenu D1 putem linearne interpolacije sa  $1^\circ \times 1^\circ$  geografske mreže na računsku mrežu 3m x 3m. U slučaju da se veličina domene D1 poveća za  $1^\circ$  radijalno od centra domene, granični i inicijalni uvjeti bivaju izmijenjeni za nove interpolirane vrijednosti. Kako bi se utvrdila veličina utjecaja proširenja domene D1 i D2, odnosno odmicanja granica od promatranog područja Riječkog zaljeva, simulirana su 4 slučaja veličina domena (Sl. 3.20) :

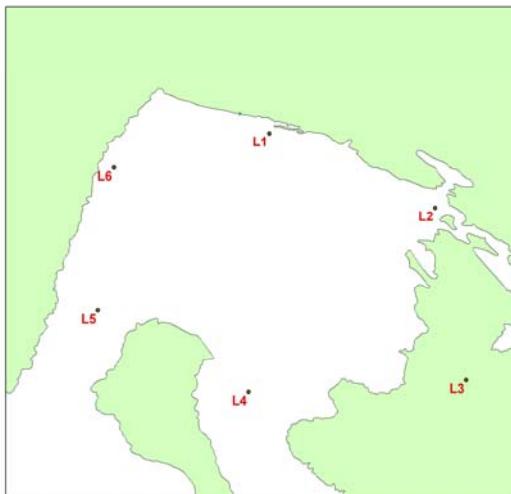
1. Simulacija S<sub>11</sub> : D1 = 300 km i D2 = 50 km
2. Simulacija S<sub>12</sub> : D1 = 300 km i D2 = 100 km
3. Simulacija S<sub>21</sub> : D1 = 450 km i D2 = 50 km
4. Simulacija S<sub>22</sub> : D1 = 450 km i D2 = 100 km

Simulacije su izvršene za referentni dan 30.07.2005. godine te su, za razliku od prethodnih analiza, inicijalizirane u +0000UTC.



Sl. 3.20 Prikaz granica inicijalnih i horizontalno proširenih domena D1 i D2

Analizirani su vertikalni temperaturni profili i profili brzine horizontalnog vjetra na šest lokacija unutar domene D2 (Slika 3.21):



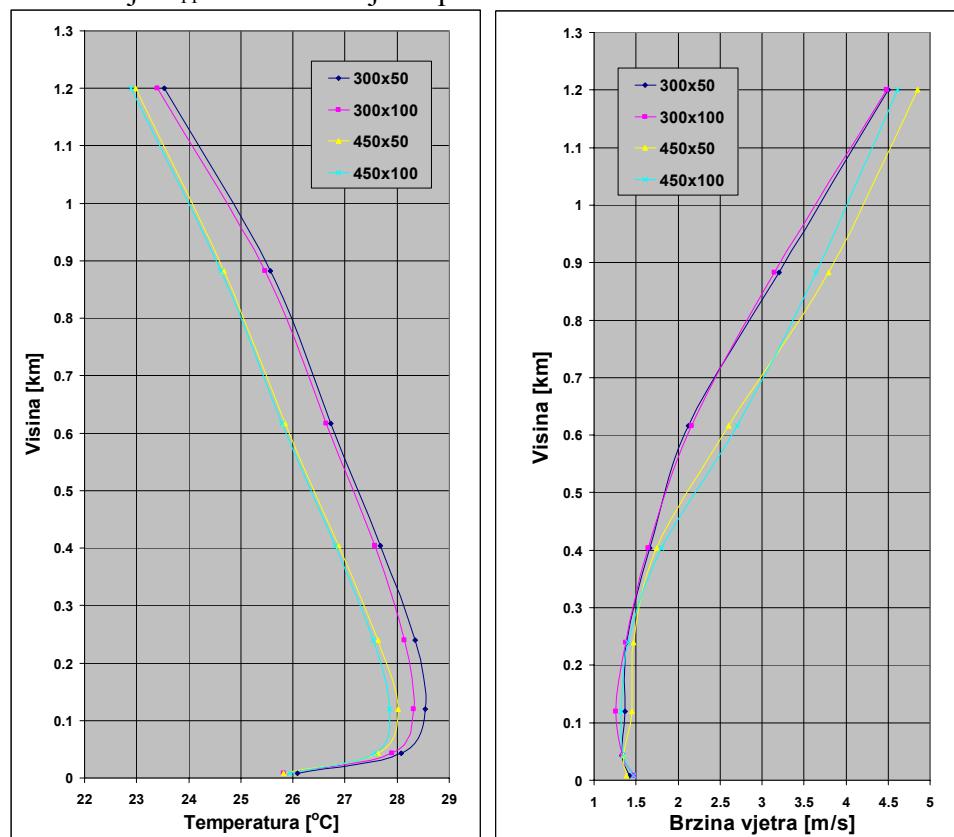
Slika 3.21 Geografski prikaz testnih lokacija domene D1

Tab. 3.4 Opis testnih lokacija domene D1

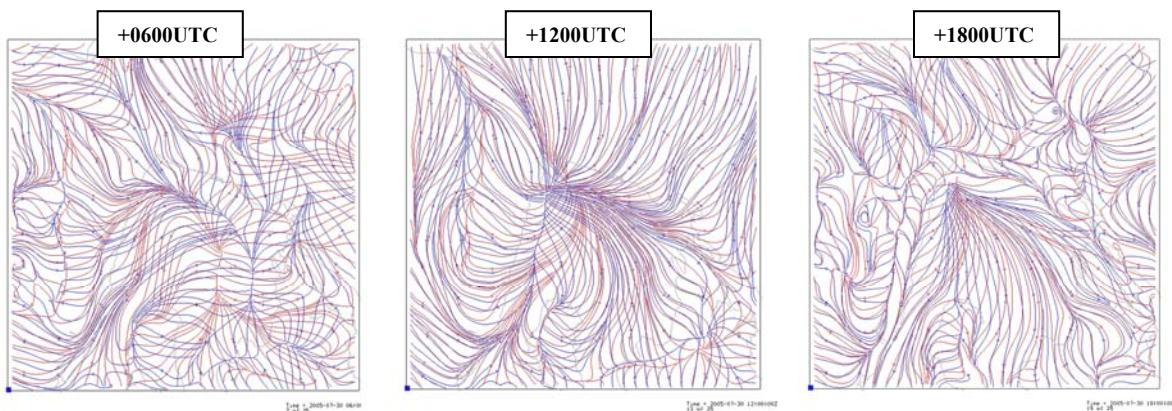
Naziv	Opis lokacije	G. širina	G. dužina
L1	Rijeka	45.32	14.42
L2	Kraljevica	45.26	14.55
L3	Krk	45.13	14.58
L4	Srednja Vrata	45.12	14.40
L5	Vela Vrata	45.18	14.28
L6	Opatija	45.29	14.29

S obzirom na malena dnevna odstupanja temperaturnih profila među testnim lokacijama prikazane su lokacijski i vremenski (24-satno) osrednjene vrijednosti temperature do visine 850hPa-ne plohe (Sl. 3.22). Podudarnost temperaturnih profila je najočitija između simulacija iste veličine domene D1 što znači da proširenje domene D2 nema utjecaja na temperaturno polje. Također, može se zaključiti kako se razlika između temperaturnih profila  $S_{1X}$  i  $S_{2X}$  simulacija nalazi unutar greške modeliranja te iznosi  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , a s obzirom na usporedbe  $S_{XX}$  simulacija sa satelitskim poljima. Prema tome, može se zaključiti kako se rezultati simulacija proširenih domena D1 i D2 ne razlikuju od referentne simulacije  $S_{11}$ , odnosno simulacije horizontalne veličine domena D1=300km i D2=50km. Do istog zaključka može se doći

analizom profila amplitude brzina vjetra nad šest testnih lokacija. Sl. 3.22 zorno prikazuje podudarnost brzina vjetra svih  $S_{XX}$  simulacija u nižim slojevima atmosfere, dok je u višim slojevima atmosfere očitija razlika između  $S_{11}$  i  $S_{2X}$  simulacija, iako nedovoljna za odbacivanje referentne simulacije  $S_{11}$  kao simulacije s optimalnom veličinom računske domene.



Sl. 3.22 Prostorno i vremenski osrednjeni vertikalni profili temperatura (lijevo) i brzina vjetra (desno) proširenih i referentnih domena D1 i D2



Slika 3.23 Usporedba strujnica vjetra na 1000hPa-noj plohi u domeni D2 između simulacija  $S_{11}$  (crvene strujnice) i  $S_{21}$  (plave strujnice) za tri vremenska trenutka (s lijeva na desno +0600UTC, +1200UTC i +1800UTC)

Pored vertikalnih profila promatranih veličina usporedjene su prizemne strujnice vjetra referentne simulacije  $S_{11}$  sa svim ostalim provedenim simulacijama. Kao što i Slika 3.23 prikazuje, strujnice  $S_{11}$  i  $S_{21}$  simulacija podjednako opisuju sve lokalne i mezoskalne fenomene Riječkog zaljeva s neznatnim odstupanjima. Neznatno odstupa položaj formiranja fronte smorca (+0600UTC sa Slika 3.23), odnosno središnje dnevne obalne cirkulacije

Riječkog zaljeva, dok su konvektivna podizanja zraka nad središtem otoka Krka te uzduž grebena Učke i Cresa i advektivne pojave terenskih kanalizacija kroz Vela Vrata i Vinodolski kanal podjednako uočljive kod obje simulacije.

Veličina računske domene S11, odnosno  $D1=300\text{km}$  i  $D2=50\text{km}$ , sasvim dovoljno opisuje meteorološke pojave na mezoskalnoj skali Riječkog zaljeva te će biti korištena u daljnjoj evaluaciji modela kakvoće zraka.

### 3.5 Zaključak

MM5 sustav za meteorološko mezoskalno modeliranje pokazao se kao kvalitetan i fleksibilan alat u pripremi graničnih i inicijalnih meteoroloških polja za sustav modeliranja kakvoće zraka. Analizirane su karakteristike računskih domena poput horizontalnih i vertikalnih rezolucija te međusobna udaljenost granica unutarnje ugniježđene domene D2 i vanjske domene D1. Provedene testne simulacije pokazale su kako su računske domene, koje zadovoljavaju postavljene kriterije te posjeduju minimalno dovoljnu rezoluciju i veličinu domene, sljedećih karakteristika:

- **horizontalna rezolucija domene D1**  $dx = dy = 3 \text{ km}$ ,
- **horizontalna rezolucija domene D2**  $dx = dy = 1 \text{ km}$ ,
- **vertikalna rezolucija domena D1 i D2** sa 18 vertikalnih  $\sigma$  slojeva ugušćenih prema topografiji terena,
- **veličina domene D1** jednaka  $300 \times 300 \text{ km}$ ,
- **veličina domene D2** jednaka  $50 \times 50 \text{ km}$ .

Računske domene navedenih karakteristika koristit će se za pripremu emisija te konačno pri evaluaciji modela kakvoće zraka tijekom odabranog petodnevног vremenskog intervala.

## 4 PRIPREMA I PROCESIRANJE EMISIJA

### 4.1 UVOD

Modeli kakvoće zraka prognoziraju onečišćenje nad lokalnim ili mezoskalnim područjem u različitim vremenskim koracima ovisno o namjeni simulacije. Većina takvih simulacija bazira se, osim na učitanim meteorološkim poljima, i na detaljno pripremljenim rubnim uvjetima emisija iz površinskih izvora onečišćenja. Emisijski rubni uvjeti moraju biti dostavljeni modelu kakvoće zraka jednoliko često kao i meteorološka polja iz mezoskalnih meteoroloških modela. Međutim, većina nacionalnih emisijskih inventara osmišljena je i prilagođena zadovoljiti potrebe izvještavanja sukladno međunarodnim protokolima kako bi se procijenili višegodišnji trendovi porasta ili smanjenja emisija pojedinih zemalja, a u svrhu donošenja preventivnih mjera i zakonskih odredbi prilagođenih budućem stanju kakvoće zraka. Prema tome većina dostupnih podataka o emisijama iz nacionalnih inventara emisija prikazana je u obliku prosječnih godišnjih vrijednosti. Idealni slučaj bio bi kada bi industrijski i ostali izvori onečišćenja kontinuirano nadopunjavali bazu nacionalnog inventara u razmacima ne većim od jednog sata. S obzirom da je to u stvarnosti pomalo nemoguće očekivati od izrazite je važnosti pronaći takav sustav pripreme emisija kojim bi se iskoristile prosječne godišnje vrijednosti emisija iz prizemnih izvora za izradu rubnih uvjeta sa satnom vremenskom rezolucijom. SMOKE sustav za procesuiranje emisija pokazao se vrlo fleksibilnim sustavom za pripremu rubnih uvjeta za CMAQ kemijski transportni model. SMOKE omogućuje pripremu svih kategorija emisija sukladno SCC<sup>20</sup> klasifikaciji SAD-ove agencije za zaštitu okoliša (EPA).

Hrvatski inventar emisija prilagođen je Europskom CORINAIR inventaru emisija koji prati SNAP 97 klasifikaciju te vrijedi za sve zemlje Europe. Korištenje SMOKE programa stoga iziskuje adaptaciju SNAP97 na SCC nomenklaturu emisija.

U ovom dijelu prikazan je cjelokupni proces pripreme, prilagodbe i procesiranja emisija pomoću SMOKE sustava za konačno dobivanje površinskih rubnih uvjeta nad računskim domenama D1 i D2 i za vremenski period odabrane epizode. Pripremljeni rubni uvjeti koristit će se kao ulazni podaci za kemijski transportni model CMAQ, tj. posljednju fazu modeliranja kakvoće zraka.

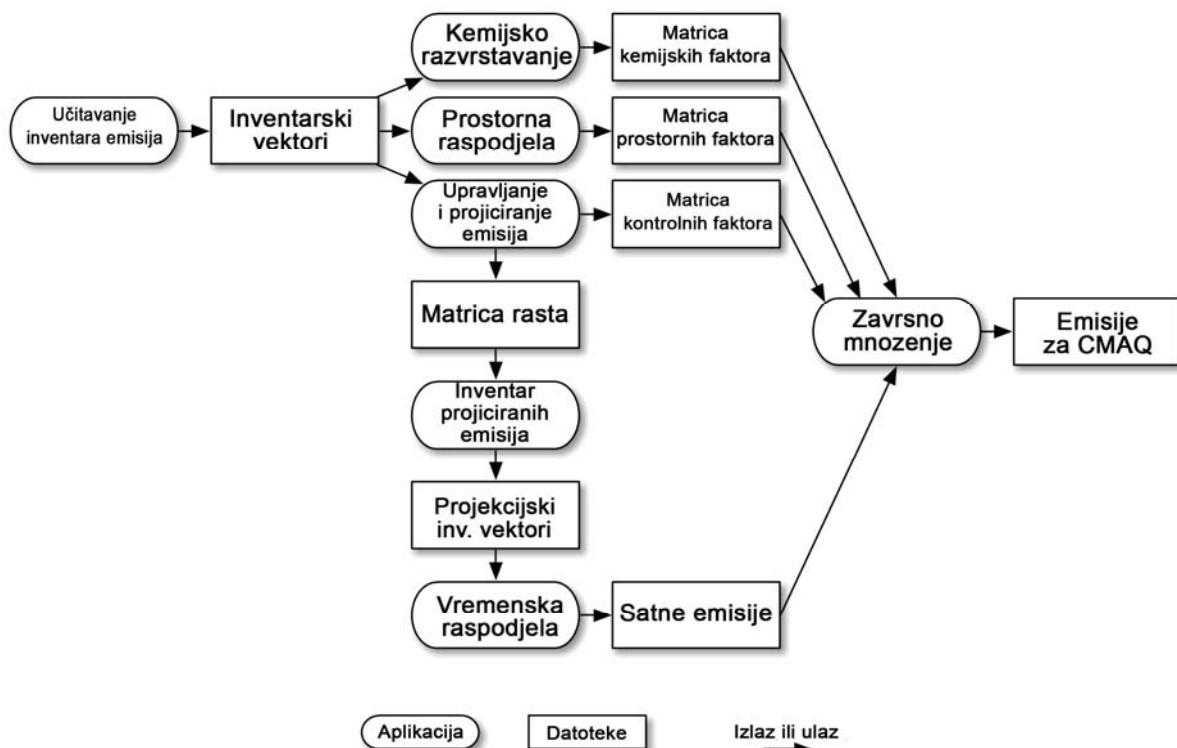
### 4.2 SMOKE - SUSTAV ZA PROCESIRANJE EMISIJA

Svrha upotrebe SMOKE sustava za modeliranje emisija je u tome da prilagodi podatke iz nacionalnog američkog inventara emisija na vremenu i prostornu rezoluciju kemijskih transportnih modela sustava za modeliranje kakvoće zraka. Prva verzija programa razvijena je 1996. god. na sveučilišnom centru za modeliranje okoliša EMC Sveučilišta Sjeverne Karoline iz SAD-a. Već iz samog naziva SMOKE sustava (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) može se utvrditi metodologija koja prati cijeli sustav. Sustav aplikacija izrađen je modularno kako bi se omogućila fleksibilnost istraživanja. Većina emisijskih inventara predstavlja veliku količinu podataka koji su, s obzirom na prostorni smještaj, nejednoliko te u većini slučajeva vrlo rijetko rasprostranjeni. Tu činjenicu iskorištava SMOKE sustav na način da transformira inventar emisija u matrične i vektorske zapise podataka te transformira emisije u mrežno prilagođene ulazne podatke za CMAQ koristeći HPC algoritme za rješavanje rijetkih matrica.

<sup>20</sup> SCC – Standard Classification Code

SMOKE omogućuje procesiranje površinskih, točkastih i pokretnih antropogenih te biogene izvore emisija kroz niz zajedničkih i prema vrsti emisija svojstvenih faza.

Glavne faze SMOKE sustava su učitavanje inventara emisija (*Import inventory*), projiciranje rasta i kontrola učitanih emisija (*Growth&Control*), prostorna raspodjela emisija na rezoluciju mreže računske domene (*Gridding*), kemijsko razvrstavanje emisija na onečišćujuće tvari koje očekuje kemijski transportni model CMAQ (*Speciation*) te vremenska transformacija srednjih godišnjih vrijednosti emisija (*Temporal Allocation*) za promatranu vremensku epizodu i vremensku rezoluciju kemijskog transportnog modela CMAQ.



#### **Sl. 4.1 Dijagram toka SMOKE sustava aplikacija i odgovarajućih ulaznih i izlaznih datoteka u vektorskom i matričnom zapisu**

Prema Sl. 4.1 može se zaključiti kako svaki modul SMOKE sustava izrađuje specifičnu matricu. Matrice se sastoje od faktora koji određuju na koji način će se dekomponirati srednja godišnja vrijednost emisije pohranjena u inventarskom vektoru. Vremenska transformacija je jedini modul koji producira vrijednosti emisija u satnom vremenskom koraku. Konačne izlazne emisije dobivamo na temelju matričnog umnoška (*Merge*) satnih emisija i ostalih matrično zapisanih faktora za prostornu, kemijsku i kontrolnu raspodjelu ili razvrstavanje emisija, a prema jednadžbi

$$E_{i,j,k}(k,h) = EI(k) \cdot f_S(k) \cdot f_{G_{i,j}}(k) \cdot f_C(k) \cdot f_{GW}(k) \cdot f_T(k,h), \quad (4.1)$$

gdje je  $f_s(k)$  faktor za kemijsko razvrstavanje,  $f_{G_{i,j}}(k)$  faktor prostorne raspodjele,  $f_c(k)$  kontrolni faktor,  $f_{GW}(k)$  faktor rasta i  $f_T(k, h)$  faktor vremenske raspodjele, a  $EI(k)$  učitana emisija ili aktivnost izvora onečišćenja.

Prikazani dijagram tijeka samo je okvirni prikaz procesa procesiranja emisija. Pored glavnih postoje i specifične faze vezane uz pojedinu vrstu emisija koje će biti opisane u sklopu obrađivanja pojedinih glavnih faza kroz koje će se detaljnije objasniti princip rada svake od faza.

## 4.2.1 Priprema inventara i prostorna raspodjela emisija

### 4.2.1.1 Inventar emisija

Inventar emisija predstavlja skup datotečno organiziranih informacija o onečišćavalima iz prizemnih izvora onečišćenja. SMOKE sustav za procesiranje emisija (u dalnjem tekstu SMOKE) očekuje, kao ulazne podatke, emisije organizirane prema kategorijama onečišćivača sukladno SCC nomenklaturi SAD-ovog nacionalnog inventara emisija. Svaku kategoriju izvora onečišćenja SMOKE procesuira zasebno te je za svaku od njih potrebno pripremiti njima specifične informacije. Među standardne informacije, koje je potrebno pripremiti za pojedinu kategoriju izvora, ubrajaju se vrijednosti kritičnih emisija prema UNECE konvenciji, a to su ugljični monoksid CO, dušični oksidi NO<sub>x</sub> te halapljivi organski spojevi VOC<sup>21</sup> ili ukupni organski plinovi TOG<sup>22</sup>. Zatim slijede čestične emisije u koje se ubrajaju amonijak NH<sub>3</sub>, sumporni dioksid SO<sub>2</sub> te partikularne čestice aerodinamičkog promjera manjeg od 10 µm PM<sub>10</sub> i promjera manjeg od 2.5 µm PM<sub>2.5</sub>. Toksične emisije sljedeća su skupina mogućih vrsta podataka o emisijama, a najčešće su vezane za sve kategorije izvora emisija. U tu skupinu pripadaju policiklički organski spojevi, razni metalni spojevi i dr. Pored nabrojenih toksičnih emisija, među kojima se neki pojavljuju čak svake druge ili više godina poput olovnih oksida, u skupinu toksičnih plinova pripadaju i fotoreaktivni spojevi poput 1,3-butadiena, akroleina, formaldehida te acetaldehida koji su sastavni dijelovi ispušnih plinova iz pokretnih izvora onečišćenja te time sveprisutni sudionici ljudskog okoliša. Međutim, najčešći oblik informacija o emisijama pokretnih izvora pojavljuje se u obliku prostorne i vremenske aktivnosti pokretnih izvora nad nekim područjem (ceste, pomorski pravci i sl.).

### 4.2.1.2 Kategorizacija izvora emisija

SMOKE sustav kategorizira izvore emisija na sljedeći način: stacionarni površinski izvori (netočkasti), necestovni pokretni izvori, cestovni pokretni izvori, točkasti izvori, šumski požari i biogeni izvori emisija. S obzirom na različiti pristup procesiranja svake pojedine kategorije onečišćivača, opisat će se svaka kategorija zasebno.

**Stacionarni površinski izvori onečišćenja.** SMOKE omogućuje unos kritičnih i toksičkih emisija iz stacionarnih površinskih izvora, odnosno izvora koji se nalaze površinski rasprostranjeni nad nekim područjem (najčešće gradsko područje, područje općine, županije ili nekog drugog područja). Primjeri takvih izvora su kućanska ložišta, građevinske fasadne emisije, velika gradilišta, ali i svi drugi oblici prostorno rasprostranjenih točkastih i drugih manjih skupina izvora čije pojedinačne emisije nisu mjerene, već procijenjene na temelju aktivnosti koje su odgovorne za njihov nastanak.

**Necestovni pokretni izvori onečišćenja.** Ovu skupinu pokretnih izvora onečišćenja predstavljaju sva pokretna sredstva koja se ne koriste klasičnim prometnicama za svoje prometanje. Toj skupini pripadaju lokomotive, konstrukcijska građevinska vozila, brodovi i ostala pomorska motorna prometala, poljoprivredni i ostali motorni strojevi. Ovakvi su izvori onečišćenja u većini slučajeva ograničenog prostornog područja djelovanja te ih se kategorizira kao površinske izvore onečišćenja.

**Cestovni pokretni izvori onečišćenja.** Cestovni pokretni izvori predstavljaju sva motorna vozila koja se kreću cestama, a mogu biti prikazana kao prostorno raspoređeni izvori ili kao izvori duž prostornih linija, cesta. Procesiranje emisija iz motornih vozila provodi se unutar SMOKE sustava pomoću programa MOBILE6 koji, na temelju informacija o ukupnoj dnevnoj količini prijeđenog puta pojedine vrste vozila nad pojedinom dionicom i vrstom

<sup>21</sup> VOC – Volatile Organic Compounds

<sup>22</sup> TOC - Total Organic Gas

ceste, dozvoljenoj brzini pojedine vrste cesta, meteorološkim uvjetima na cesti te ostalim potrebnim informacijama, određuje količinu i vrstu emisija.

**Točkasti izvori onečišćenja.** Točkasti izvori su izvori koji se mogu identificirati točno prema svojoj prostornoj lokaciji, a njihove se emisije kontinuirano prate sukladno propisima vezanim uz takve izvore emisija. Točkasti izvori se nadalje dijele na izvore emisija iz postrojenja za proizvodnju električne energije PPEE<sup>23</sup> (najveći izvori kritičkih emisija poput NO<sub>x</sub> i SO<sub>2</sub>) i na one koji ne proizvode električnu energiju. Primjeri izvora koji ne proizvode električnu energiju su kemijske industrije i proizvođači namještaja.

**Šumski požari.** Šumski požari se najčešće tretiraju kao stacionarni površinski izvori ili kao točkasti izvori kod kojih je unaprijed izračunata visina dizanja dima i njihova nizstrujna koncentracija te, na razini dnevne ili satne vremenske rezolucije, učitana u SMOKE sustav kako bi se udružila s emisijama ostalih vrsta izvora. Ovim radom nije obuhvaćen preproračun šumskih požara s obzirom da ih na odabranom području domene D1 nije bilo tijekom promatranog vremenskog perioda.

**Biogeni izvori onečišćenja.** Biogene izvore onečišćenja predstavlja sveukupna vegetacija koja postoji nad područjem računske domene te koja, sukladno meteorološkim uvjetima (pogodna temperatura, vlažnost te sunčeva insolacija), emitira organske lebdeće organske spojeve, dušikov monoksid te ostale organske spojeve većeg broja ugljikovih baza od kojih je najznačajnija skupina terpena (izoterpeni i monoterpeni) vrlo reaktivnih fotooksidativnih spojeva, prekursora troposferskog ozona. Ulazne podatke za SMOKE sustav predstavlja baza podataka o biogenoj iskoristivosti tla na temelju koje SMOKE koristeći BEIS3<sup>24</sup> model izračunava satne koncentracije meteorološki baziranih biogenih emisija. Zbog nedostatka informacija o iskoristivosti tla nad promatranim područjem izostavljen je izračun biogenih emisija.

#### 4.2.1.3 Priprema i prostorna raspodjela emisija za domenu D1

Računska domena D1, veličine 300x300 kvadratnih kilometara, pokriva područja Italije, Slovenije, Austrije, Bosne i Hercegovine i Hrvatske, te je za pripremu emisija nad D1 domenom potrebno koristiti CORINAIR-ov europski nacionalni inventar emisija. CORINAIR inventar emisija sadrži informacije o aktivnosti raznih izvora onečišćenja kategoriziranih sukladno IPCC<sup>25</sup> / OECD<sup>26</sup>-ovoj i UNECE/EMEP-ovoj nomenklaturi SNAP<sup>27</sup>-97 koji su prostorno raspoređeni na EMEP-ovu mrežu rezolucije 0.5° x 0.5° koja pokriva područje cijele Europe. U pripremi emisija korišteni su podaci o emisijama iz glavnih sektora SNAP-97 nomenklature preuzete iz EMEP-ovog WebDab sučelja za prikaz inventara emisija. Ovako pripremljene emisije odgovaraju SMOKE kategoriji stacionarnih površinskih izvora.

Tab. 4.1 prikazuje opis pojedinog sektora te odgovarajući SCC-ov opći kod. Emisijska prilagodba SCC kodovima omogućuje korištenje faktora kemijskog i vremenskog razvrstavanja, faktora rasta te kontrolnih faktora, koji odgovaraju pojedinom izvoru onečišćenja, a nalaze se pohranjeni u datoteci profila pojedinih faktora.

<sup>23</sup> PPEE – Postrojenja za proizvodnju električne energije

<sup>24</sup> BEIS3 – Biogenic Emission Inventory System v3.09

<sup>25</sup> IPCC – International Panel on Climate Change

<sup>26</sup> OECD – Organization for Economic Co-operation and Development

<sup>27</sup> SNAP – Selected Nomenclature for Air Pollution

**Tab. 4.1 Prikaz uskladivanja SNAP i SCC nomenklature emisijskih izvora onečišćenja**

Indeks SNAP sektora	Opis glavnih sektora nomenklature	SNAP	SCC opći kod	Opis odgovarajućih izvora emisija prema SCC-u
S1	Izgaranje u termoenergetskim postrojenjima i postrojenjima za transformaciju energije	2101000000		Stationary Source Fuel Combustion : Electric Utility
S2	Izgaranje u ne-industrijskim ložištima	2104000000		Stationary Source Fuel Combustion : Residential
S3	Izgaranje u industriji	2102000000		Stationary Source Fuel Combustion : Industrial
S4	Proizvodni procesi	2399000000		Industrial Processes
S5	Pridobivanje i distribucija fosilnih goriva i geotermalne energije	2501000000		Petroleum and Petroleum Products Storage
S6	Korištenje otapala i ostalih proizvoda	2495000000		Solvent Utilization
S7	Cestovni promet	2201001000		Mobile Sources : Highway Vehicles
S8	Ostali pokretni izvori i strojevi	2260000000		Mobile Sources : Off-highway Vehicles
S9	Obrada i odlaganje otpada	2601000000		Waste Disposal, Treatment and Recovery
S10	Poljoprivreda	2801000000		Agricultural Production
S11	Ostali izvori i ponori	-	-	-

SMOKE zahtijeva specifičnu metodologiju unosa podataka o emisijama iz stacionarnih površinskih izvora. Emisije moraju biti prikazane kao godišnje ukupne vrijednosti nad pojedinom administrativnom jedinicom i za pojedinu kategoriju izvora emisija. Kako bi se prostorno rasporedile emisije na mrežu računske domene, potrebno je pripremiti i prostorne faktore (*spatial surrogates*) koji predstavljaju udjele površinski osrednjениh vrijednosti emisija za svaki dio čelije mreže koji presijeca pojedinu općinu/županiju, u ukupnoj općinskoj/županijskoj vrijednosti emisije.

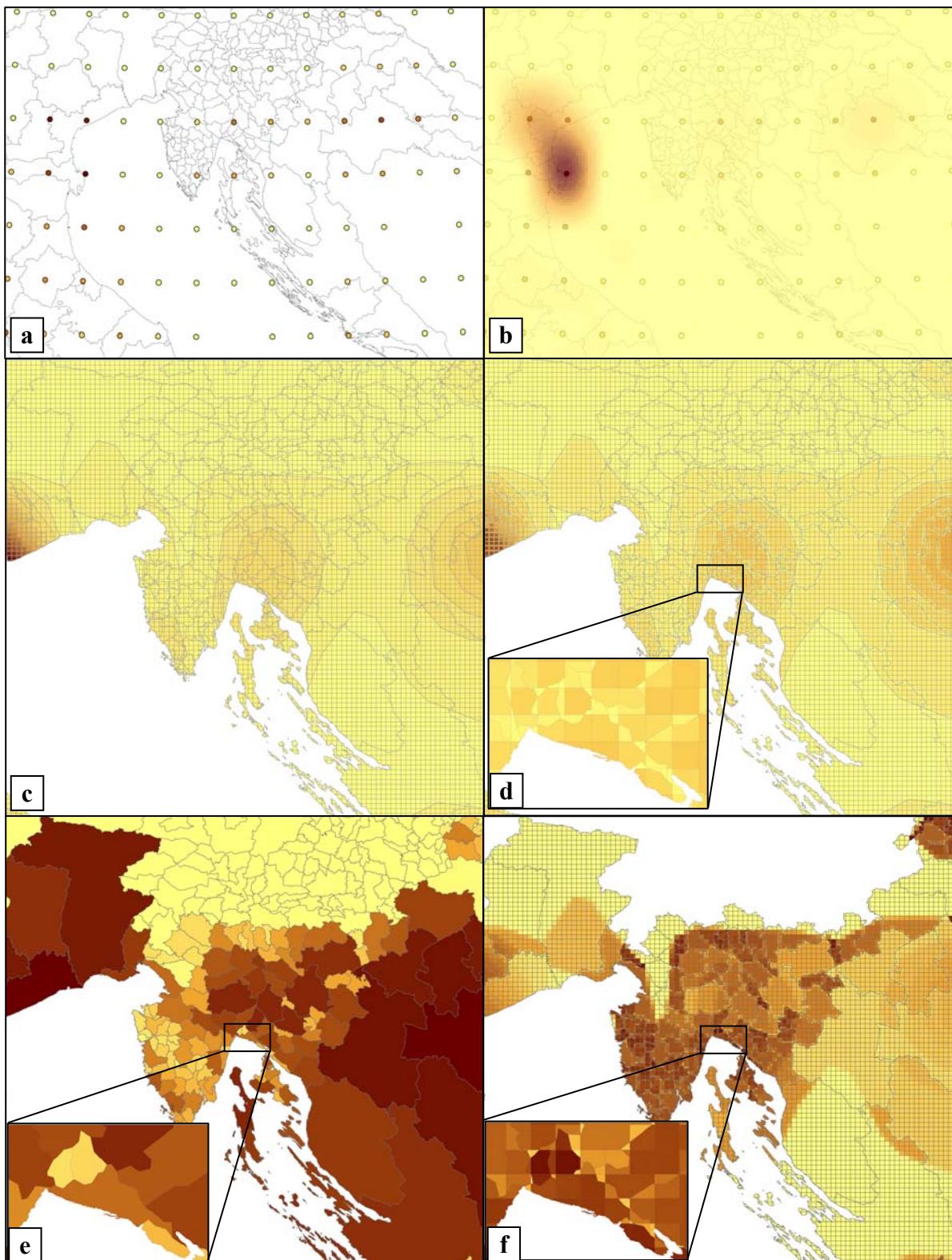
Postupak pripreme emisija prema tome zahtijeva korištenje GIS softvera sposobnog da izradi konturna polja emisija (Slika 4.2b) na temelju njihovih točkastih vrijednosti iz EMEP-ove mreže emisija raspoređenih na geografskim koordinatama (Slika 4.2a), a za svaki sektor prema SNAP-97 nomenklaturi. Kako bi se ujednačila raspodjela izokontura emisija, emisije su normalizirane te vrijednosno klasificirane u 50 izokonturih vrijednosti za svako pojedino onečišćavalo. ArcGIS programski paket korišten je kako bi se izradili skriptirani algoritmi cijelog postupka izračunavanja prostornih faktora i ukupnih općinskih vrijednosti emisija. Sljedeći korak obuhvaća presjecanje čelija numeričke mreže s poligonima konturnih polja emisija, transformiranih u koordinatni sustav Lambert-Komformne konične projekcije numeričke mreže D1 i s općinskim/županijskim poligonima (Slika 4.2c). Za svaki dobiveni poligon pojedinog dijela čelije izračunavaju se površinski udjeli emisija u odnosu na površinu pojedine čelije prema jednadžbi (4.2) (Slika 4.2d). Slika 4.3 prikazuje primjer podjеле čelija s obzirom na dvije vrijednosne izokonture emisija  $EI_j$  i  $EI_{j+1}$  i s obzirom na tri općine  $i$ ,  $i+1$ ,  $i+2$ . Svaki podijeljeni dio čelije posjeduje jedan dio ukupne emisije čelije, a izračunava se koristeći površinske udjele u cijeloj čeliji prema

$$e_{i,j}^{k,l} = EI_j \frac{A_{i,j}^{k,l}}{A^{k,l}}. \quad (4.2)$$

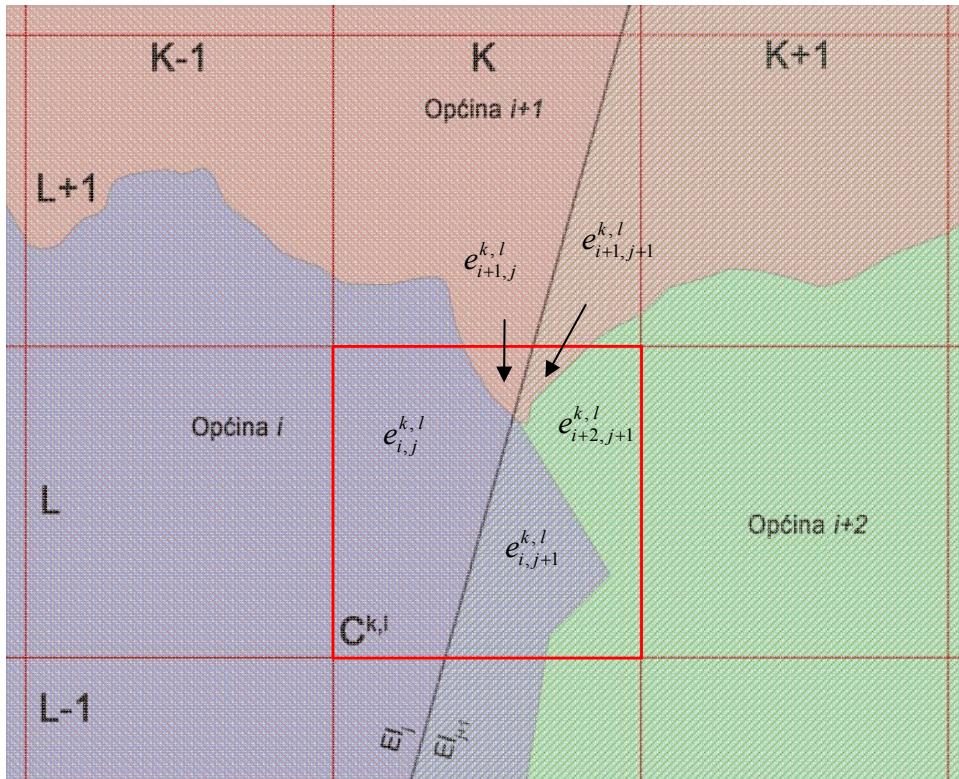
Zbroj svih emisija dijelova ili cijelih čelija koje pripadaju pojedinoj općini/županiji predstavlja ukupnu vrijednost općine  $i$ , a izračunava se prema jednadžbi (4.3).

$$E_{ukupna\ općinska}^i = \sum_{k,l} \sum_j e_{i,j}^{k,l}, \forall C_{k,l} : A^{k,l} \cap A_{opći} \neq \emptyset \quad (4.3)$$

Slika 4.2e prikazuje ukupne općinske/županijske emisijske vrijednosti svih općina/županija koje presjecaju domenu D1, a koje predstavljaju prvi ulazni podatak za SMOKE. Prostorni udjel pojedine emisijske vrijednosti u općinskoj ukupnoj vrijednosti je posljednji korak procesa pripreme emisija te je za domenu D1 prikazan na Slika 4.2f.



Slika 4.2 Slikoviti prikaz postupka pripreme ukupnih općinskih emisija i prostornih faktora na temelju emisija iz CORINAIR europskog inventara emisija raspoređenih na EMEP-ovu mrežu, a upotrebom ArcGIS programskog paketa. Prikazani primjer se odnosi na emisije ugljičnog monoksida CO iz S1 sektora prema SNAP-97 nomenklaturi. (a) Emisije raspoređene na EMEP-ovoj  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  mreži, (b) Splajn interpolacija emisija i stvaranje poligona konturnih polja emisija, (c) Emisije dijelova čelija nastale presjekom emisijskih i općinskih poligona sa čelijama numeričke mreže domene D1, (d) Površinom težinski osrednjene emisije dijelova čelija, (e) Ukupne općinske/županijske emisije, (f) Prostorni faktori dijelova čelija



Slika 4.3 Prikaz čelije  $C^{k,l}$  te emisijske vrijednosti pojedinih dijelova čelije s obzirom na pripadnost pojedinoj općini  $i$  i emisijskoj vrijednosnoj klasifikaciji  $j$

Prostorni udjel (ili faktor) pojedinog dijela čelije koja pripada općini  $i$ , je sukladno primjeru sa Slika 4.3 jednak

$$f_i^{k,l} = \frac{\sum_j e_{i,j}^{k,l}}{E_{\text{ukupna općinska}}^i} \quad (4.4)$$

Na taj način pripremljeni su svi faktori i ukupne općinske vrijednosti koje koristi SMOKE pri matričnoj rekonstrukciji vrijednosti emisije u pojedinoj čeliji. Vrijednost emisije svake pojedine čelije u konačnici predstavlja sumu umnožaka prostornih faktora i ukupnih općinskih emisija svih općinskih udjela, a sukladno jednadžbi (4.5) i primjeru čelije  $C^{k,l}$  sa Slika 4.3.

$$\bar{e}_{\text{čelija}}^{k,l} = \sum_i E_{\text{ukupna općinska}}^i \cdot f_i^{k,l} \quad (4.5)$$

Ovakvim postupkom pripremljene su CO, NH<sub>3</sub>, NMVOC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> i PM<sub>10</sub> emisije za prvih deset glavnih sektora emisija dok je jedanaesti sektor S11 izostavljen s obzirom da u CORINAIR bazi nema podataka za taj sektor.

#### 4.2.1.4 Priprema i prostorna raspodjela emisija za domenu D2

Za razliku od domene D1, domena D2 pokriva mnogo manje područje (50x50 kvadratnih kilometara) te je finije horizontalne rezolucije što čini EMEP bazu neprimijerenom za primjenu nad domenom D2. Stoga će se za pripremu emisija nad ugniježđenom domenom D2 koristiti podaci o emisijama iz pojedinih točkastih izvora te aktivnosti cestovnog transporta s obzirom da su takvi podaci dostupni na razini prostorne rezolucije domene D2.

##### 4.2.1.4.1 Točkasti izvori emisija

Prema izvješćima Instituta za mikrobiološka istraživanja o mjerjenjima onečišćenja zraka na području Republike Hrvatske tijekom 2004. godine, riječko područje predstavlja područje treće kategorije kvalitete zraka. U njegovom širem području nalaze se tri od deset najvećih točkastih onečišćivača zraka u Republici Hrvatskoj. To su TE Rijeka, TE Plomin i Rafinerija nafte na Urinju. Pored spomenutih postoji niz drugih točkastih onečišćivača zraka čije su emisije izostavljene tijekom izrade ovog rada s obzirom na njihov minorni utjecaj na promatrano područje.

**Tab. 4.2 Specifikacija točkastih izvora i njihove godišnje emisije**

POSTROJENJE I DIMNJACI	SCC	Geografska širina	Geografska dužina	Visina dimnjaka	Promjer dimnjaka	Temperatura	Brzina plinova	SO2	NOX	CO	PM2_5	PM10
-	-	°	°	ft	ft	°F	ft/s	sht/god.	sht/god.	sht/god.	sht/god.	sht/god.
<b>RAFINERIJA NAFTE URINJ</b>												
KOTAO341-G1	10200701	45.290955	14.539516	59	5.12	878	41.470	1221.881	101.852	19.119	7.253	5.609
KOTAO341-G2	10200701	45.290798	14.539079	59	5.12	802	33.432	908.676	84.124	13.905	5.489	4.245
KOTAO BW341-G3	10200701	45.290770	14.539324	31	7.22	901	9.252	771.367	103.243	44.843	5.097	3.941
KOTAO 341-G4+G5	10200701	45.291109	14.539176	115	8.58	883	40.289	4890.305	586.781	120.624	29.208	22.587
TOPINGIII-321-F1-1	30601901	45.291065	14.539273	148	7.28	1443	22.146	1163.133	123.752	9.038	7.057	5.457
TOPINGIII-321-F1-2	30601901	45.291065	14.539273	148	7.28	1443	22.146	1163.133	123.752	9.038	7.057	5.457
PLTFORI-F3-F4-F5-1	30601901	45.291820	14.538757	95	6.43	1544	9.843	130.010	1.043	34.067	0.118	0.091
PLTFORI-F3-F4-F5-2	30601901	45.291480	14.539558	95	6.43	1544	9.843	130.010	1.043	34.067	0.118	0.091
UNIFINING-F1-F2	30601901	45.291480	14.539558	104	3.94	1368	30.840	75.086	20.510	4.171	0.059	0.045
PLATFORM2-F1	30601901	45.293605	14.538119	200	4.17	1375	16.404	29.895	13.210	3.129	0.059	0.045
PLATFORM2-F2	30601901	45.293750	14.537787	200	4.43	1398	15.748	44.843	14.600	3.129	0.059	0.045
PLATFORM2-F3-1	30601901	45.293897	14.537466	200	5.38	1189	26.247	257.238	108.805	16.338	0.412	0.318
PLATFORM2-F3-2	30601901	45.294108	14.536948	200	5.38	1189	26.247	257.238	108.805	16.338	0.412	0.318
PLATFORM2-F4	30601901	45.294108	14.536948	200	4.66	1396	14.928	50.057	20.857	3.824	0.059	0.045
WISBREAK-F-1-1	30601901	45.294220	14.536707	95	3.61	1332	29.528	94.552	56.314	17.381	0.196	0.152
WISBREAK-F-1-2	30601901	45.294220	14.536707	95	3.61	1332	29.528	94.552	56.314	17.381	0.196	0.152
FCC	30600201	45.295648	14.533216	407	13.45	1141	11.909	2727.071	410.538	2919.652	27.640	21.375
<b>TE PLOMIN</b>												
2HNE10	10100101	45.145900	14.167000	1115	19.42	703	98.425	8172.399	3284.832	317.460	0.000	0.000
<b>TE RIJEKA</b>												
-	10100401	45.290700	14.539630	1115	19.42	703	98.425	7030.423	1999.559	0.000	238.692	184.588

Tab. 4.2 prikazuje sve potrebne informacije kako bi SMOKE procesirao emisije iz pojedinih dimnjaka odabranih za procesiranje. Informacije o dimnjacima i emisijama prikupljene su iz godišnjih izvještaja o zračnim emisijama pojedinih izvora prijavljenih u KEO Agencije za zaštitu okoliša i iz toksikoloških analitičkih izvještaja iz ANT laboratorija.

Specifičnost procesuiranja točkastih izvora, upotrebom SMOKE sustava, je eksplicitno izračunavanje visine dizanja dima prema Briggsovim jednadžbama i Pasquil-Gilfortovim koeficijentima difuzije procjenjujući koncentracije onečišćenja za sve visinske sigma slojeve koji sijeku perjanicu dima. Iz tog razloga SMOKE zahtijeva pripremu ostalih informacija kao što su visina i promjer dimnjaka te temperatu i brzinu izlaznih plinova. Proces prostorne raspodjele kod točkastih je izvora vrlo jednostavan. Zbroj koncentracija emisija iz svih točkastih izvora, koji se nalaze nad određenom célijom, predstavlja emisiju pojedine célige.

##### 4.2.1.4.2 Pokretni izvori emisija

Pokretne izvore emisija čine sve kategorije cestovnih motornih vozila koji putem niza raznovrsnih fizikalnih procesa emitiraju onečišćujuće tvari u zrak. SMOKE sustav za

procesiranje emisija koristi MOBILE6 model kako bi na temelju prometne aktivnosti ocijenio emisijske faktore za svaki pojedini proces (npr. ispuh tijekom pokretanja hladnog motora, ispuh tijekom trajanja vožnje, ishlapljivanje goriva, itd.).

Kako bi se odredila prometna aktivnost MOBILE6, model zahtijeva informacije o prosječnoj brzini prometanja na pojedinoj vrsti ceste (Tab. 4.3) te ukupnom godišnjem prijeđenom putu  $VMT^{28}$  prikazanom za svaku kategoriju vozila i cesta unutar određene administrativne jedinice.

**Tab. 4.3 Ograničenja brzina na prometnicama sukladno SMOKE klasifikaciji**

TIP CESTE	AIRS AMS CODE	VRSTA CESTE	OGRANICENJE BRZINA NA CESTAMA [km/h]							
			LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	LDDV	LDDT	HDDV	MC
1	110	AUTOCESTA	130	130	90	90	130	130	90	130
2	130	POLUAUTOCESTA/BRZA	110	110	80	80	110	110	80	110
3	150	DRŽAVNE CESTE	90	90	80	80	90	90	80	90
4	270	GLAVNE URBANE/RURALNE	50	50	50	50	50	50	50	50
5	290	LOKALNE URBANE/RURALNE	50	50	30	30	50	50	30	50

SMOKE prihvata  $VMT$  i brzine prometanja sortirane za svaku kategoriju vozila i cesta sukladno SCC klasifikaciji prikazanoj u Tab. 4.4.

**Tab. 4.4 SCC nomenklatura pokretnih izvora vezanih sa pojedinom kategorijom ceste**

SMOKE KOD	KRATKI NAZIV	KATEGORIJE VOZILA / CESTA	AIRS AMS <sup>1</sup> KOD	110	130	150	270	290
			AUTOCESTA	POLUAUTOCESTA/ BRZA CESTA	DRŽAVNE CESTE	GLAVNE URBANE/ RURALNE	LOKALNE URBANE/ RURALNE	
0100	LDGV	Laka benzinska vozila	220100110	220100130	220100150	220100270	220100290	
0102	LDGT1	Laki benzinska teretna vozila I	220102110	220102130	220102150	220102270	220102290	
0104	LDGT2	Laki benzinska teretna vozila II	220104110	220104130	220104150	220104270	220104290	
0107	HDGV	Teška benzinska vozila	220107110	220107130	220107150	220107270	220107290	
3000	LDDV	Laka dizelska vozila	223000110	223000130	223000150	223000270	223000290	
3006	LDDT	Laka dizelska teretna vozila	223006110	223006130	223006150	223006270	223006290	
3007	HDDV	Teška dizelska teretna vozila	223007110	223007130	223007150	223007270	223007290	
0108	MC	Motocikli/Mopedi	220108110	220108130	220108150	220108270	220108290	

<sup>1</sup>AIRS - The Aerometric Information Retrieval System

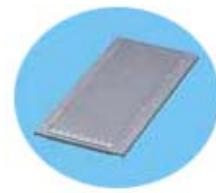
Godišnji prijeđeni put unutar svake općine izračunat je korištenjem dostavljenih izvještaja iz Hrvatskih cesta o mjerenjima prosječnog godišnjeg dnevнog prometa PGDP ili prosječnog ljetnog dnevнog prometa PLDP prikupljenih putem automatskih brojila prometa sa Sl. 4.4.



**QLD 6-CX**  
neprekidno automatsko brojilo  
svremene generacije



**SBH (DL-2000)**  
ADR/2000  
neprekidno automatsko brojilo



**NC-90A**  
povremeno automatsko brojilo

**Sl. 4.4 Automatska brojila prometa**

Svaki od prikazanih brojača prometa posjeduje vlastitu klasifikaciju vozila. QLD 6-CX brojač prometa slovenskog proizvođača MIKROBIT klasificira vozila koristeći induktivne

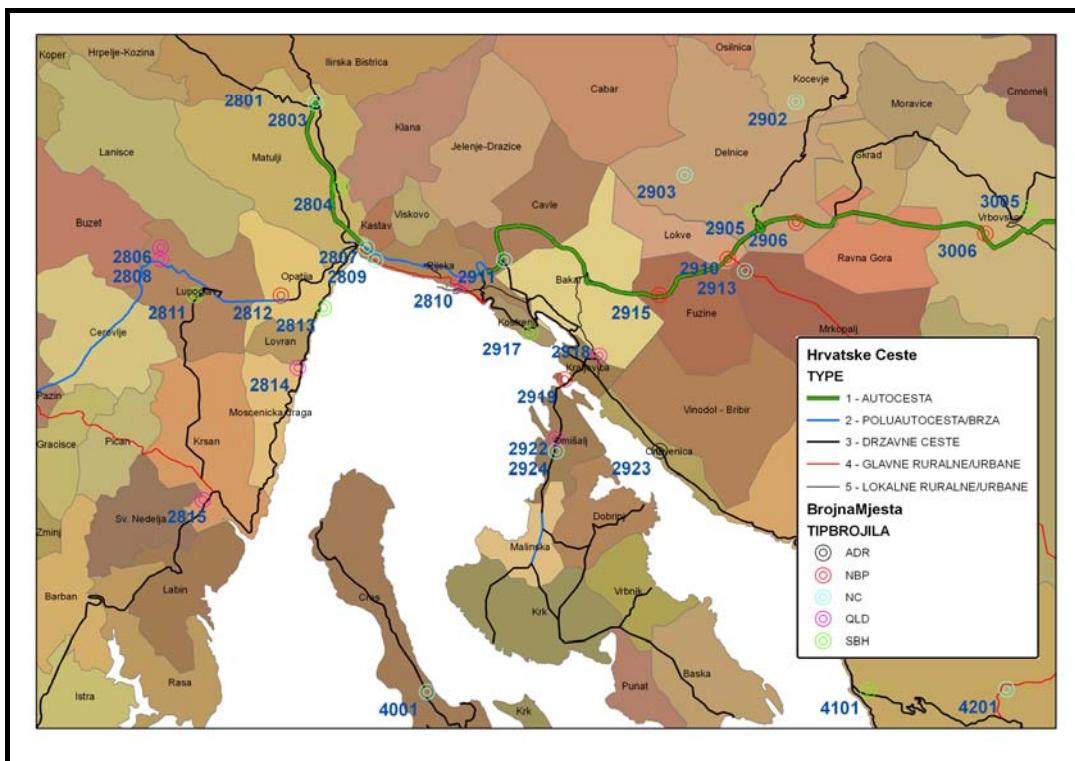
<sup>28</sup>VMT – Vehicles Miles Travelled

petlje koje induciraju različiti signal za svaku od sljedeće tri kategorije : A – osobna vozila, B – teretna vozila i C – autobusi te dodatne podjele unutar navedenih glavnih grupa. Mjerači njemačkih proizvođača Signalbau Huber SBH te PEEK-ovi ADR-2000 piezoelektrični su senzori koji klasificiraju vozila prema težini kao što je prikazano na Tab. 4.5.

**Tab. 4.5 Uskladivanje klasifikacija vozila prema SMOKE/MOBILE6 modelu i prema brojilima prometa Hrvatskih cesta**

SMOKE/MOBILE6	LDGV	LDDT1	LDDT2	HDDV	LDDV	LDDT	HDDV	MC
KOD	0100	0102	0104	0107	3000	3006	3007	0108
SBH	Osobna vozila Traktori Radna vozila		Teretna vozila < 3.5 t	Autobusi Teretna vozila 3.5 - 7 t Teretna vozila > 7 t Teretna vozila s prikolicom Tegijači	Osobna vozila	Teretna vozila < 3.5 t	Autobusi Teretna vozila 3.5 - 7 t Teretna vozila > 7 t Teretna vozila s prikolicom Tegijači	-
QLD	A2	B1	A3 A4	B2 B3 B4 C1	A2	A3 A4	B2 B3 B4 C1	A1
NBP	I	IX	II	III IV	I	II	III IV	
ADR/NC	do 5,5t		5,5t do 9,1t I	5,5t do 9,1t II 9,1t do 12,2t 12,2t do 16,5t preko 16,5t	do 5,5t		5,5t do 9,1t II 9,1t do 12,2t 12,2t do 16,5t preko 16,5t	

Prema tome uskladene su klasifikacije pojedinih brojila prometa s klasifikacijom SMOKE/MOBILE6 modela. Koristeći ArcGIS programski paket, korelirane su lokacije pojedinih brojila prometa sa SMOKE-ovim kategorijama cesta prikazanih na Sl. 4.5 te je na taj način dobivena informacija o količini prosječnog godišnjeg dnevног prometa za pojedinu cestu i kategoriju vozila.



**Sl. 4.5 Prikaz lokacija i tipova brojila prometa na cestama šireg riječkog područja razvrstanih u pet kategorija cesta**

Ukupan godišnji prijeđeni put  $VMT$  unutar svake općine izračunava se pomoću jednadžbe (4.6), a na temelju duljine  $L$  i prosječnog godišnjeg dnevног prometa  $PDP$  (odnosno  $PGDP/PLDP$ ) zabilježenog na brojilu prometa pojedine kategorije prometnice koja siječe pojedinu općinu.

$$VMT(\text{tip ceste}, \text{tip vozila}, \text{općina}) =$$

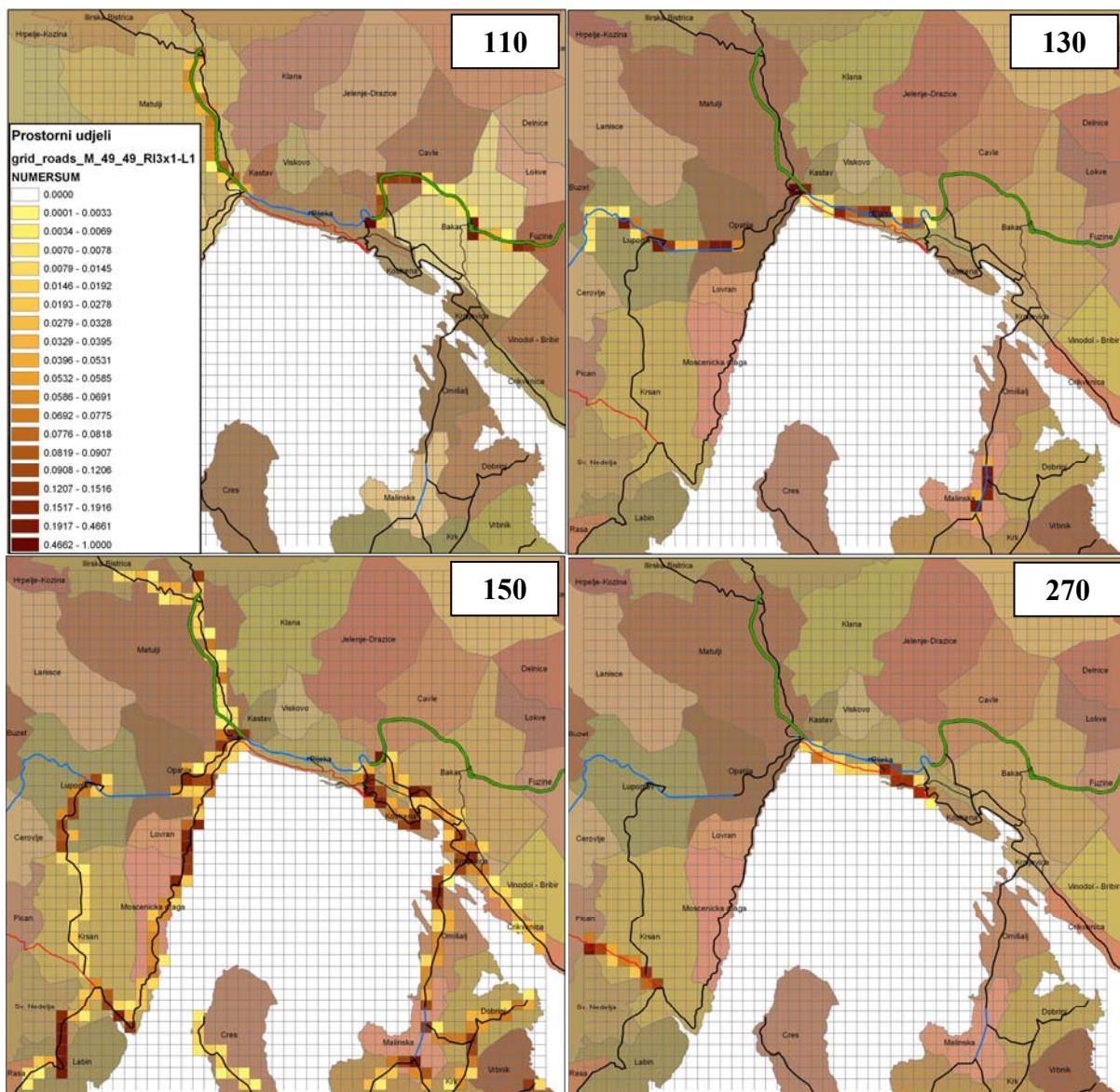
$$PDP(\text{tip ceste}, \text{tip vozila}, \text{općina}) \cdot 365 \frac{[\text{dan}]}{[\text{god.}]} \cdot L(\text{tip ceste}, \text{općina}) [\text{km}] \cdot 1.609 \frac{[\text{miles}]}{[\text{km}]} \quad (4.6)$$

U većini slučajeva prosječni dnevni promet izražava se za brojno mjesto te je stoga potrebno identificirati kategoriju ceste na kojoj se nalazi mjerač prometa te, sukladno klasifikacijama vozila pojedine vrste mjerača, odrediti PDP za svaku kategoriju ceste i vozila. Tab. 4.6 prikazuje prosječne godišnje i ljetne dnevne promete sistematizirane sukladno spomenutim preporukama.

**Tab. 4.6 Prosječni godišnji i ljetni dnevni promet na brojačkim mjestima raspoređenih na općine, vrste cesta i vozila projiciran za 2005. god. na temelju brojenja prometa tijekom 2001-2004 (preuzeto iz Hrvatskih cesta, 2005.)**

Oznaka brojačkog mjeseta	Opcina	Vrsta ceste	Naziv	Prosječni godišnji dnevni promet (PGDP)								Prosječni ljetni dnevni promet (PLDP)							
				LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	LDDV	LDDT	HDDV	MC	LDGV	LDGT1	LDGT2	HDGV	LDDV	LDDT	HDDV	MC
2807	51000	130	Riječka obilaznica	9251	0	767	951	9251	767	951	0	5103	0	207	262	5103	207	262	0
2809	51000	270	Pavlovac	3806	0	176	143	3806	176	143	0	4008	0	457	530	4008	457	530	0
2810	51000	130	Tunel Katarina	10299	256	783	1154	10299	710	1154	147	4095	32	252	111	4095	252	111	226
2804	51211	150	Mučići	5510	6	87	363	5510	87	363	88	13763	0	856	1085	13763	856	1085	0
2816	51211	150	Permani - sjever	4568	0	208	423	4568	208	423	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2903	51218	270	Crni Lug	297	0	10	23	297	10	23	0	402	0	29	26	402	29	26	0
2905	51218	150	Delnice	2439	43	112	394	2439	112	394	44	6006	384	409	564	6006	409	564	0
2906	51218	110	Ravna Gora - zapad	3783	276	352	544	3783	352	544	0	5875	51	276	280	5875	276	280	140
2925	51218	270	Crni Lug - sjever	326	0	16	25	326	16	25	0	12395	684	954	979	12395	954	979	0
2911	51219	150	Mavrinici	5128	0	345	489	5128	345	489	0	7340	69	527	262	7340	527	262	212
2917	51221	150	Kostrena	4325	7	165	434	4325	165	434	52	390	0	49	54	390	49	54	0
2926	51222	110	Čvoriste Oštrovica - jug	2098	0	105	233	2098	105	233	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2928	51250	150	N. Vinodolski - sjeverozapad	2649	0	209	358	2649	209	358	0	1112	0	66	55	1112	66	55	0
2929	51250	150	Senj - sjever	2336	0	162	299	2336	162	299	0	1152	0	69	57	1152	69	57	0
2923	51260	150	Crikvenica	8677	5	583	755	8677	583	755	5	674	0	64	65	674	64	65	0
2918	51262	150	Križišće	2261	37	139	168	2261	116	168	45	5738	0	346	493	5738	346	493	0
2919	51262	150	NP Krčki most	2465	2328	288	184	2465	288	184	0	511	0	21	17	511	21	17	0
4104	51280	150	Rab	1640	0	87	76	1640	87	76	0	8672	6	195	479	8672	195	479	291
2913	51315	270	Bukovac	329	0	22	23	329	22	23	0	12207	7	760	962	12207	760	962	7
2927	51315	270	Mrkopalj - istok	108	0	4	5	108	4	5	0	1096	0	66	54	1096	66	54	0
2910	51316	110	Delnice - zapad	3878	324	342	489	3878	342	489	0	5498	3240	406	251	5498	406	251	0
2915	51322	110	Vratna - zapad	3809	302	335	473	3809	335	473	0	8099	0	317	283	8099	317	283	0
3006	51326	110	Vrbovsko - zapad	3783	259	360	560	3783	360	560	0	1245	0	124	379	1245	124	379	0
2812	51410	130	NP Tunel "Učka"	2819	0	358	488	2819	358	488	0	2151	0	43	60	2151	43	60	0
2813	51410	150	Iščići	5931	8	175	411	5931	175	411	180	1202	0	60	48	1202	60	48	0
2814	51415	150	Medveja	1760	22	122	70	1760	41	70	76	271	0	7	11	271	7	11	0
2930	51500	150	Kornić	2601	0	166	143	2601	166	143	0	1341	0	64	55	1341	64	55	0
2922	51513	150	Omišali	3411	50	326	228	3411	148	228	86	5468	319	389	569	5468	389	569	0
2924	51513	150	Sveti Vid	4040	0	193	225	4040	193	225	0	56	0	3	3	56	3	3	0
4001	51557	150	Predošćica	403	0	18	17	403	18	17	0	10116	11	113	506	10116	113	506	164
2817	52220	150	Raša	1302	0	69	79	1302	69	79	0	7643	520	580	724	7643	580	724	0
2815	52232	150	Stepčići	2256	24	161	168	2256	88	168	49	7105	447	559	724	7105	559	724	0
2806	52426	150	Lupoglavl - sjever	1804	35	137	214	1804	139	214	28	4377	46	493	407	4377	493	407	108
2808	52426	130	Lupoglavl - jug	2574	38	328	337	2574	174	337	40	12752	275	981	1224	12752	981	1224	327
2811	52426	150	Vranja	824	9	25	77	824	25	77	37	3056	30	212	174	3056	212	174	91

Godišnje ukupne vrijednosti  $VMT$  raspoređuju se na numeričku mrežu D2 koristeći prostorne faktore koje je, kao i u slučaju stacionarnih izvora, potrebno pripremiti za svaku pojedinu vrstu ceste na razini općina kao najmanjih administrativnih jedinica. Prostorni faktori u ovom slučaju predstavljaju udjele duljine cesta kroz pojedinu čeliju u ukupnoj duljini ceste unutar općine koju čelija presijeca te tako za svaku kategoriju cesta (Slika 4.6).



**Slika 4.6 Prikaz prostornih faktora svih kategorija cesta koje presijecaju numeričku mrežu domene D2 na kojima postoje brojila prometa.**

#### 4.2.2 Kemijsko razvrstavanje emisija

Pripremljeni inventar emisija izrađen je na temelju vrijednosti emisija ili aktivnosti pojedinih kategorija izvora onečišćenja. U većini slučajeva takve emisije predstavljaju grupe kemijskih spojeva istih kategorija. Nasuprot tome, kemijski mehanizmi (npr. CB4) modela kakvoće zraka sadrže niz specifičnih kemijskih stehiometrijskih jednadžbi čiji su sudionici osnovni kemijski spojevi. Primjer predstavljaju  $NO_x$  emisije iz EMEP-ovog inventara stacionarnih izvora vanjske domene D1 koji predstavljaju zajedničku vrijednost dušičnog monoksida  $NO$  i dušičnog dioksida  $NO_2$ . Takav je slučaj i sa  $PM$  česticama te sa hlapljivim organskim spojevima  $VOC$  koji za svaku kategoriju izvora onečišćenja imaju drugačije udjele i sastav pojedinih organskih kemijskih spojeva. Prema tome, procesiranje emisija pomoću SMOKE sustava podrazumijeva razvrstavanje emisija koristeći profile udjela pojedinih kemijskih spojeva, svojstvenih određenom kemijskom mehanizmu modela kakvoće zraka, u ukupnoj grupnoj vrijednosti emisija za svaku kategoriju izvora onečišćenja.

Kemijski spojevi koji su sastavni dio emisija iz pokretnih izvora određuje MOBILE6 model na temelju aktivnosti cestovnog prometa, kategorija vozila i meteoroloških uvjeta na cestama kao što je već navedeno u uvodnom dijelu te će zbog svoje specifičnosti biti obrađeni zasebno ostalim kategorijama izvora.

#### 4.2.2.1 Razvrstavanje emisija iz stacionarnih točkastih i netočkastih izvora

Razvrstavanje emisija iz stacionarnih izvora nametnutih na vanjsku domenu D1 te emisija iz točkastih izvora unutar domene D2 provodi se korištenjem tablice udjela (u dalnjem tekstu profila) pojedinih kemijskih spojeva u ukupnoj emisijskoj vrijednosti. Svaka kategorija izvora emisija sadrži drugačije profile s obzirom na karakter aktivnosti pojedinog izvora. Tab. 4.7 prikazuje kodove profila iz korištenih kategorija izvora preuzetih od EPA-inog inventara emisija iz 2003.

**Tab. 4.7 SCC profilni kodovi za razvrstavanje emisija (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2)**

Emisije	PM <sub>2,5</sub>	VOC	CO	NO <sub>X</sub>	NH <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>X</sub>
SCC	Točkasti izvori (domena D2)						
<b>10100101</b>	0	-	0	0	0	0	0
<b>10100401</b>	22002	-	0	0	0	0	0
<b>10200701</b>	22004	-	0	0	0	0	0
<b>30600201</b>	22041	-	0	0	0	0	0
<b>30601901</b>	22043	-	0	0	0	0	0
SCC	EMEP sektori stacionarnih izvora (domena D1)						
<b>2101000000</b>	99999	9001	0	0	0	0	0
<b>2102000000</b>	99999	9001	0	0	0	0	0
<b>2104000000</b>	99999	9001	0	0	0	0	0
<b>2201000000</b>	99999	1101	0	0	0	0	0
<b>2260000000</b>	35700	1101	0	0	0	0	0
<b>2399000000</b>	22054	0	0	0	0	0	0
<b>2495000000</b>	22042	9028	0	0	0	0	0
<b>2501000000</b>	22043	1190	0	0	0	0	0
<b>2601000000</b>	22009	122	0	0	0	0	0
<b>2801000000</b>	22059	9008	0	0	0	0	0

Faktor za kemijsko razvrstavanje koji određuje molni i/ili maseni udio pojedinog kemijskog spoja u inventarskim emisijama izračunava se primjenom jednadžbe (4.7):

$$f_s(k, i, j) = VtT_k \frac{f_{k,i,j}}{M_j} \quad (4.7)$$

gdje je  $k$  SCC kategorija izvora,  $i$  vrsta emitirane onečišćujuće tvari za određenu kategoriju izvora,  $j$  specifični kemijski spoj pripremljen za CMAQ transportni kemijski model,  $VtT_k$  faktor uvećanja emisijske vrijednosti nemetanskih hlapljivih organskih spojeva NMVOC kako bi se uključile emisije metana sukladno profilima razvrstavanja emisija "VOC to TOG" EPA-e iz 2003. god. (kod ostalih emisija nema utjecaja te je jednak jedinici),  $f_{k,i,j}$  molni udjeli pojedinog kemijskog spoja u emisijskoj vrijednosti sukladno profilima iz Tab. 4.7 te  $M_j$  [g/mol] molekularna težina pojedinog kemijskog spoja.

Tab. 4.8 prikazuje  $f_{k,i,j}$  i  $M_j$  specificirane za emisije CO, NH<sub>3</sub>, NO<sub>X</sub>, PM10 i SO<sub>X</sub>, dok Tab. 4.9 i Tab. 4.10 prikazuju  $f_{k,i,j}$  i  $M_j$  halapljivih organskih spojeva čije su emisije preuzete iz EMEP/CORINAIR-ove baze te prikazane skupno u obliku NMVOC emisija. To su redom ALD2 - acetaldehidi i viši aldehidi, FORM - formaldehid, te ugljikohidrati ETH -eten

(CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>), ISOP izopren, OLE – ugljikohidrati olefinske ugljikove veze (C=C), PAR – ugljikohidrati parafinske ugljikove veze (C-C), TOL – toluen (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-CH<sub>3</sub>), XYL – ksilen (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) i NR – svi ostali nereaktivni ugljični spojevi. Metanski faktor VtTk prikazan je u Tab. 4.9.

**Tab. 4.8 Molni udjeli  $f_{k,i,j}$  i molekularne težine  $M_j$  razvrstanih kemijskih spojeva iz emisija CO, NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, PM10 i SO<sub>2</sub> prema profilima iz Tab. 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) za svaku kategoriju stacionarnih točkastih (donea D2) i površinskih (domena D1) izvora**

Emisije	CO	NH <sub>3</sub>	NO <sub>X</sub>		PM <sub>10</sub>	SO <sub>X</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	NO <sub>X</sub>		PM <sub>10</sub>	SO <sub>X</sub>
Kem. Spojevi	CO	NH <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>
		Maseni udio					Molekularna težina					
SCC		Točkasti izvori (domena D2)										
10100101	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
10100401	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
10200701	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
30600201	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
30601901	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
SCC		EMEP sektori stacionarnih izvora (domena D1)										
2101000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2102000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2104000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2201000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2260000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2399000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2495000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2501000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2601000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64
2801000000	1	1	0.62	0.05	1	0.97	28	17	30	46	1	64

**Tab. 4.9 Molni udjeli  $f_{k,i,j}$  halapljivih organskih spojeva prema profilnim kodovima iz Tab. 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) za svaku kategoriju stacionarnih površinskih izvora**

EMEP sektor	SCC	VtT(k)	PROFILNI KOD	ALD2	ETH	FORM	ISOP	NR	OLE	PAR	TOL	XYL
1	2101000000	1.58	9001	0.0000	0.0167	0.1519	0.0000	0.3888	0.0220	0.3414	0.0390	0.0400
2	2102000000	1.58	9001	0.0000	0.0167	0.1519	0.0000	0.3888	0.0220	0.3414	0.0390	0.0400
3	2104000000	1.58	9001	0.0000	0.0167	0.1519	0.0000	0.3888	0.0220	0.3414	0.0390	0.0400
4	2201000000	1.13	1101	0.0343	0.0390	0.0074	0.0007	0.1374	0.0323	0.5503	0.0700	0.1294
5	2260000000	1.13	1101	0.0343	0.0390	0.0074	0.0007	0.1374	0.0323	0.5503	0.0700	0.1294
6	2399000000	1.12	0	0.0280	0.0459	0.0157	0.0040	0.2768	0.0612	0.4669	0.0580	0.0431
7	2495000000	5	9028	0.0608	0.0294	0.0147	0.0147	0.1401	0.0847	0.5100	0.0766	0.0686
8	2501000000	1.13	1190	0.0102	0.0000	0.0004	0.0001	0.0273	0.0217	0.3707	0.2279	0.3420
9	2601000000	5.92	122	0.0000	0.0870	0.0000	0.0000	0.8898	0.0033	0.0199	0.0000	0.0000
10	2801000000	10	9008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7973	0.0000	0.2027	0.0000	0.0000

**Tab. 4.10 Molekularne težine  $M$ , halapljivih organskih spojeva prema profilnim kodovima iz Tab. 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) za svaku kategoriju stacionarnih površinskih izvora**

EMEP sektor	SCC	PROFILNI KOD	ALD2	ETH	FORM	ISOP	NR	OLE	PAR	TOL	XYL
1	2101000000	9001	0.000	28.050	30.030	0.000	15.507	28.054	14.843	95.341	109.678
2	2102000000	9001	0.000	28.050	30.030	0.000	15.507	28.054	14.843	95.341	109.678
3	2104000000	9001	0.000	28.050	30.030	0.000	15.507	28.054	14.843	95.341	109.678
4	2201000000	1101	28.965	28.050	30.030	68.120	15.422	27.547	14.296	92.498	106.684
5	2260000000	1101	28.965	28.050	30.030	68.120	15.422	27.547	14.296	92.498	106.684
6	2399000000	0	36.697	35.604	29.921	68.120	21.351	32.216	17.337	97.882	108.215
7	2495000000	9028	35.988	51.874	30.030	68.120	31.029	32.970	18.406	106.099	109.875
8	2501000000	1190	28.661	0.000	14.027	68.120	13.055	27.939	14.170	92.523	106.292
9	2601000000	122	0.000	28.050	0.000	0.000	15.751	28.053	13.595	0.000	0.000
10	2801000000	9008	0.000	0.000	0.000	0.000	23.034	0.000	22.983	0.000	0.000

**Tab. 4.11 Maseni udjeli primarnih finih čestica u emisiji PM<sub>2.5</sub> prema profilnim kodovima iz Tab. 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2002. – SMOKE v1.4) za svaku kategoriju stacionarnih točkastih (domena D2) i površinskih (domena D1) izvora**

SCC	PROFILNI KOD	PROFILI (maseni udjeli)				
		PEC	PMFINE	POA	PSO <sub>4</sub>	PNO <sub>3</sub>
<b>Točkasti izvori (domena D2)</b>						
10100101	0	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10100401	22002	0.08690	0.00000	0.25470	0.10750	0.55040
10200701	22004	0.00000	0.00000	0.19450	0.60000	0.20000
30600201	22041	0.00920	0.00000	0.49340	0.03310	0.46430
30601901	22043	0.00000	0.00000	0.72020	0.04200	0.23500
<b>EMEP sektori stacionarnih izvora (domena D1)</b>						
2101000000	99999	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
2102000000	99999	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
2104000000	99999	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
2201000000	99999	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000
2260000000	35700	0.08010	0.00000	0.12310	0.78600	0.00450
2399000000	22054	0.00890	0.00000	0.80120	0.08830	0.09860
2495000000	22042	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	0.00000
2501000000	22043	0.00000	0.00000	0.72020	0.04200	0.23500
2601000000	22009	0.03500	0.00000	0.89020	0.00680	0.06800
2801000000	22059	0.00370	0.00000	0.94030	0.05450	0.00040

Za razliku od plinovitih spojeva, koji se izražavaju u molnim vrijednostima [mol/h], partikularne čestice PM izražavaju se u obliku masenih veličinama [g/h]. To su redom PEC – primarne fine čestice elementarnog ugljika, PMFINE – ostale primarne fine čestice, POA – primarne fine čestice organskih aerosola, PNO<sub>3</sub> – primarne nitratne fine čestice i PSO<sub>4</sub> – primarne sulfatne fine čestice.

Ovim postupkom kemijski su razvrstane emisije iz točkastih i stacionarnih izvora te su time pripremljeni svi kemijski spojevi potrebni kao ulazni podaci za CMAQ sustav modeliranja kakvoće zraka.

#### 4.2.2.2 Razvrstavanje emisija iz pokretnih cestovnih izvora

Europska agencija za zaštitu okoliša EEA je putem ETC/AE<sup>29</sup>-a omogućila 1998. godine korištenje vlastito razvijenog sustava CollectER/EstimatER<sup>30</sup> za prikupljanje emisija iz svih SNAP-97 nomenklaturom kategoriziranih izvora emisija. EstimatER predstavljaju razni programi za procjenu emisija iz pojedinih sektora izvora. COPERT je jedan od EstimatER-ovih programa koji služi za procjenu emisija iz cestovnog transporta, a na temelju rezultata empirijskih testova COST319 i MEET programa provedenih tijekom 1997. i 1998. godine za sve utjecajne faktore koji omogućuju nastanak emisija iz cestovnih vozila. COPERT program koristi se isključivo za sastavljanje izvješća u svrhu usklađivanja europskog nacionalnog inventara emisija CORINAIR prikazanog na EMEP-ovoj mreži. Tako pripremljene emisije iz cestovnog prometa predstavlja EMEP-ova S7 kategorija izvora iz cestovnog transporta korištena za postavljanje rubnih uvjeta emisija nad velikom domenom D1, a unesena u SMOKE sustav kao stacionarni površinski izvor.

**Tab. 4.12 Procesi nastanka emisija iz motornih vozila, emisije i podložne kategorije vozila sukladno MOBILE6 programu (preuzeto iz *User guide to MOBILE6.2, 2003.*)**

Naziv	Opis postanka emisija	Onečišćujuće tvari	Kategorija vozila
<b>EXR</b>	emisije ispušnih plinova tijekom vožnje vozila	sva osim čestica nastalih trošenjem kočnica i guma	sva vozila
<b>EXS</b>	emisije ispušnih plinova tijekom pokretanja vozila	HC, CO, NO <sub>x</sub> i toksične tvari	laka vozila i motocikli
<b>HOT</b>	emisije ishlapljivanja zagrijanog goriva i para nakon zaustavljanja vozila	HC, benzene i MTBE <sup>31</sup>	benzinska vozila i motocikli
<b>DNL</b>	dnevne emisije ishlapljivanja nepokretnog vozila uslijed povišenja dnevne okolišne temperature	HC, benzene i MTBE	benzinska vozila i motocikli
<b>RST</b>	emisije ishlapljivanja uslijed curenja zbog slabog brtvljenja i istrošenosti cijevi i ostalih dijelova sustava za ubrzgavanje goriva	HC, benzene i MTBE	benzinska vozila i motocikli
<b>EVR</b>	emisije ishlapljivanja zagrijanog goriva vozila u vožnji	HC, benzene i MTBE	benzinska vozila
<b>CRC</b>	emisije nastale slabim brtvljenjem mjenjača	HC	benzinska vozila i motocikli
<b>RFL</b>	benzinske pare nastale tijekom punjena tanka goriva na benzinskim postajama	HC, benzene i MTBE	benzinska vozila
<b>BRK</b>	čestične tvari nastale trošenjem kočnica	čestične tvari	sva vozila
<b>TIR</b>	emisije ishlapljivanja zagrijanog goriva i para nakon zaustavljanja	čestične tvari	sva vozila

Kemijsko razvrstavanje emisija nad domenom D2 omogućuje SMOKE sustav korištenjem MOBILE6 modela za procjenu emisijskih kemijskih faktora. MOBILE6 je posebno izrađeni program koji procjenjuje trenutne i buduće emisije iz cestovnih motornih vozila, a sastavni je dio SMOKE sustava za procesiranje emisija. Izradila ga je SAD-ova Agencija za zaštitu okoliša EPA kako bi zadovoljila potrebe modeliranja onečišćenja zraka. Svaka nova verzija MOBILE programa omogućuje, na temelju kolekcije i analize novih testnih podataka, bolje razumijevanje emisijskih vrijednosti, uvjeta i faktora koji utječu na njih. MOBILE6.2 je posljednja ugrađena verzija programa u sustav SMOKE, a omogućuje izračun emisijskih faktora za četiri kategorije onečišćujućih tvari: ugljikohidrata (HC), ugljičnog monoksida (CO), dušičnih oksida (NO<sub>x</sub>) te čestičnih tvari (PM) izraženih u gramima po VMT-u za svaki od procesa nastanka emisija ili kao ukupnu emisiju. Procesi koje MOBILE6 obrađuje su prikazani u Tab. 4.12. Međutim, većina prikazanih procesa ovisi o brojnim faktorima kao što

<sup>29</sup> ETC/AE – European Topic Centre on Air Emissions

<sup>30</sup> CollectER/EstimatER – Collect/Estimate Emission Register

<sup>31</sup> MTBE – Metil Tercijarni Butil Eter

su udio pojedine kategorije vozila nad promatranim područjem i epizodnim periodom vremena, starost vozila, parametri hlapljivosti goriva, brzini vozila, temperatura okoliša, itd. Prema tome raznovrsnost ovisnosti emisijskih faktora čini procesiranje pokretnih izvora emisija najsloženijim dijelom SMOKE sustava. Većina potrebnih informacija preuzeta je iz EPA-inih testova provedenih na vozilima kako bi se utvrdili utjecaju starosti vozila, brzine, hlapljivosti i vrste goriva te ostali utjecaji na stvaranje emisija iz motornih vozila tijekom vožnje ili stajanja vozila. Vremenski uvjeti, među kojima su temperatura i relativna vlažnost najvažnije veličine, preuzeti su i pripremljeni iz MM5 izlaznih datoteka.

Važno je naglasiti kako je geografska lokacija od izrazite važnosti za proračun emisija, općenito. Klasifikacija vozila prema vrsti i starosti je karakteristična i jedinstvena svakoj zemlji s obzirom na njezin prosječni standard građana, iako postoje svjetski trendovi koji utječu na sve zemlje svijeta. Detaljnija analiza te obrada emisija iz cestovnog transporta specifičnog za lokaciju i vrijeme uvelike utječe na točnost procijenjenih emisija MOBILE6 programa.

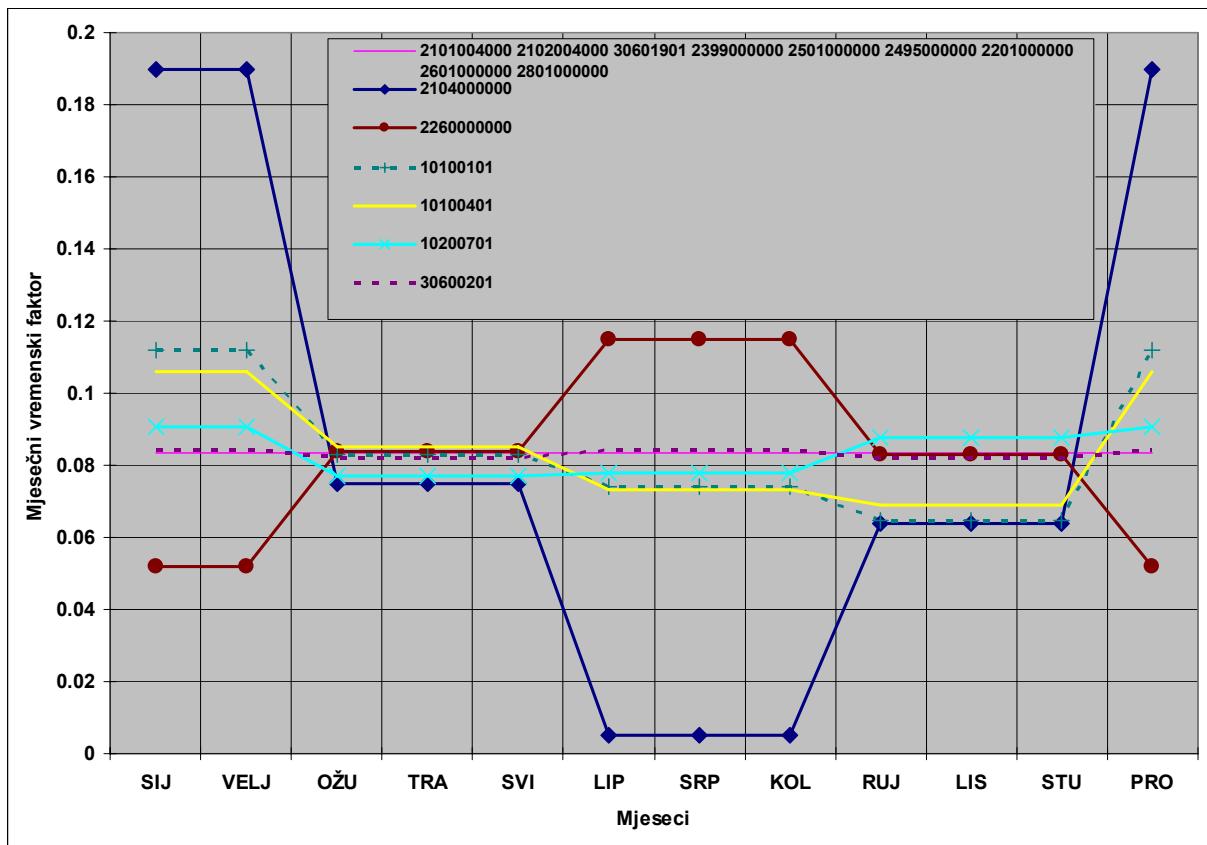
#### 4.2.3 Vremenska raspodjela emisija

Vremenska raspodjela emisija je posljednji proces tijekom pripreme emisija u SMOKE sustavu. Primarna svrha joj je primijeniti vremenske profile, temeljene na specifičnosti pojedinog izvora, na ukupne godišnje emisije iz inventara emisija. Faktori su sistematizirani u mjesecne, tjedne i dnevne vremenske profile, a moguće je primijeniti specifičan faktor za specifične dane. Primjer tome su praznici koje SMOKE definira kao nedjelju te zahtijeva prethodno definiranu listu datuma takvih specifičnih dana. Umnožak godišnjeg, mjesecnog i dnevnog vremenskog faktora u konačnici rezultira satnim koncentracijama za svaki epizodni sat prema jednadžbi (4.8):

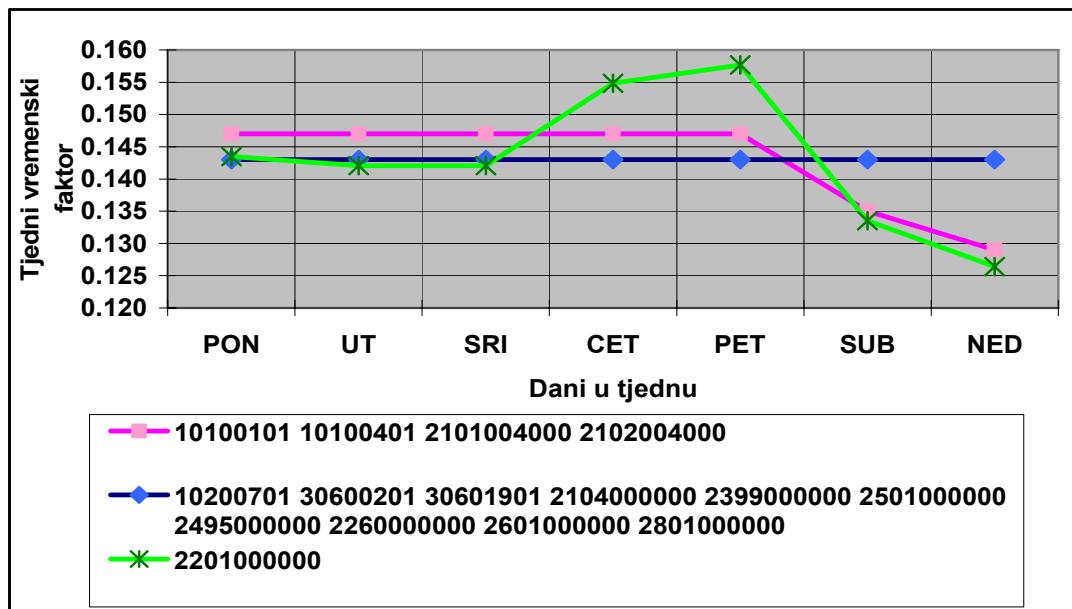
$$f_T(k, \text{datum}) = \begin{cases} f_{mj}(k, mj) \cdot f_{dan}(k, dan) \cdot f_{sat}(k, sat) & \text{datum } \neq \text{praznik} \\ f_{mj}(k, mj) \cdot f_{dan}(k, nedjelja) \cdot f_{sat}(k, sat) & \text{datum } = \text{praznik} \\ f_{norm} & \text{satno normalizirano} \end{cases} \quad (4.8)$$

Sl. 4.7 prikazuje mjesecne vremenske faktore za svaki od pripremljenih točkastih i stacionarnih izvora emisija. Najviše se izdvaja profil iz SCC kategorije 2104000000, odnosno EMEP sektor S2 koji pokriva izgaranje iz neindustrijskih ložišta, tj. u većinskom dijelu kućanskih ložišta čije je korištenje intenzivnije tijekom najhladnijih zimskih mjeseci. Drugi istaknuti profil je profil SCC kategorije 2260000000, odnosno emisije iz necestovnog transporta koji je vidljivo pojačan tijekom ljetnih mjeseci.

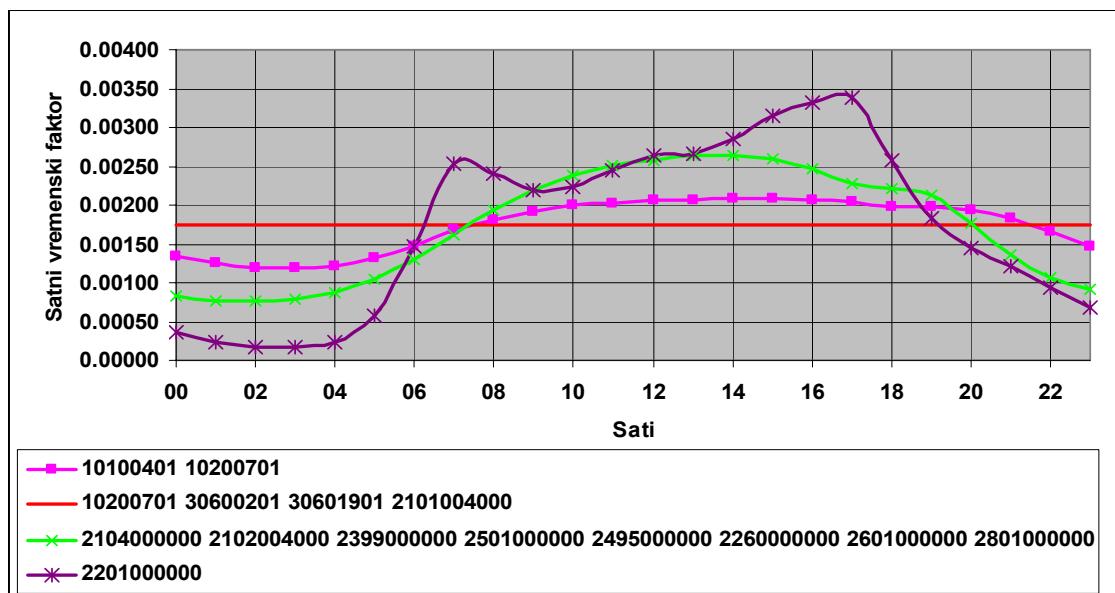
Sl. 4.8 i Sl. 4.9 prikazuju tjedne i dnevne vremenske faktore za točkaste i stacionarne izvore, respektivno. Većina izvora emisija posjeduje jednolike tjedne i dnevne emisije. Vidljiv je pojačani transport cestovnih vozila iz EMEP glavnog sektora S7, odnosno SCC kategoriji koda 2201001000, u zadnjim danima tjedna (četvrtak, petak) te pad prometne aktivnosti i emisija iz točkastih i stacionarnih izvora sa termoenergetskih postrojenja tijekom vikenda. Dnevni trend cestovnog transporta očituje se u pojačanom transportu tijekom jutarnje gužve prije radnog vremena (7-8) i nešto intenzivnijem tijekom poslijepodnevne gužve kraja radnog vremena (15-17). Emisije većine ostalih izvora su ujednačene tijekom 24 sata ili su pojačane tijekom dana.



Sl. 4.7 Mjesečni vremenski profili  $f_{mj}$  primjenjeni na točkaste (domena D2) i stacionarne izvore (domena D1) za svaki SCC kod pojedinog korištenog izvora onečišćenja (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/ATPRO SMOKE v2.2 sustava)

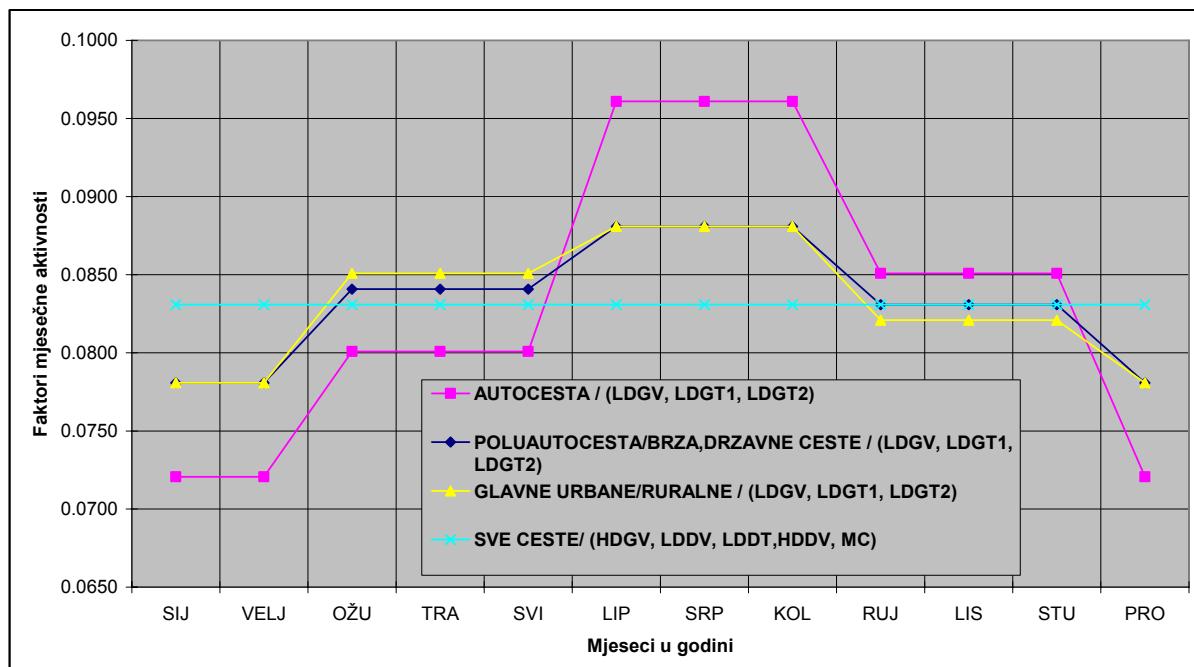


Sl. 4.8 Dnevni vremenski faktori  $f_{dan}$  primjenjeni na točkaste (domena D2) i stacionarne izvore (domena D1) za svaki SCC kod pojedinog korištenog izvora onečišćenja (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/ATPRO SMOKE v2.2 sustava)

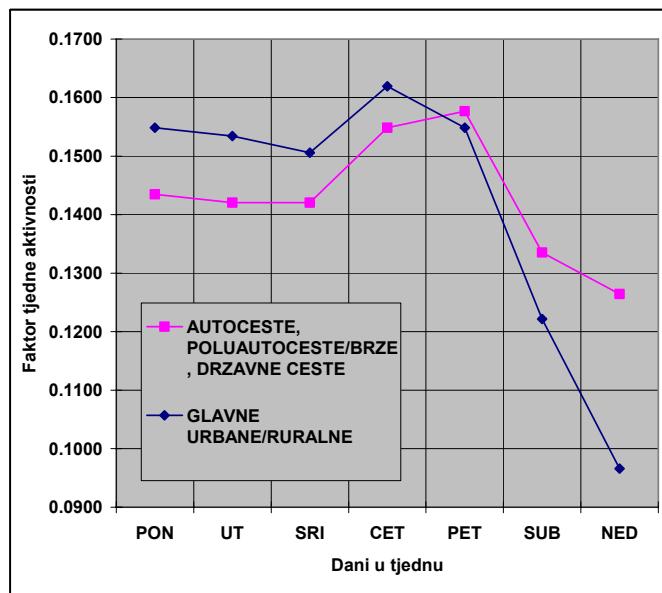


Sl. 4.9 Satni vremenski faktori  $f_{sat}$  primjenjeni na točkaste (domena D2) i stacionarne izvore (domena D1) za svaki SCC kod pojedinog korištenog izvora onečišćenja (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/ATPRO SMOKE v.2.2 sustava)

Emisije iz cestovnog prometa nad domenom D2 pripremljene na temelju informacija o prometnoj aktivnosti također su izražene kao ukupne godišnje vrijednosti za pojedinu cestu i kategoriju vozila. Vremenski profili cestovne aktivnosti za pojedinu cestu i vozilo prikazuju vremenske faktore mjesecnih, dnevnih i satnih aktivnosti. Sl. 4.10 prikazuje trendove mjesecnih cestovnih aktivnosti sukladno EPA-inim vremenskim profilima ugrađenim u SMOKE sustav putem ATREF/ATPRO datoteka. Izražene su ljetne aktivnosti svih lako kategorija vozila, a osobito na autocestama. Teška vozila posjeduju jednoliku aktivnost na svim kategorijama cesta. Sl. 4.11 prikazuje sličan trend cestovnim aktivnostima S7 EMEP kategorije stacionarnih izvora nad domenom D1.



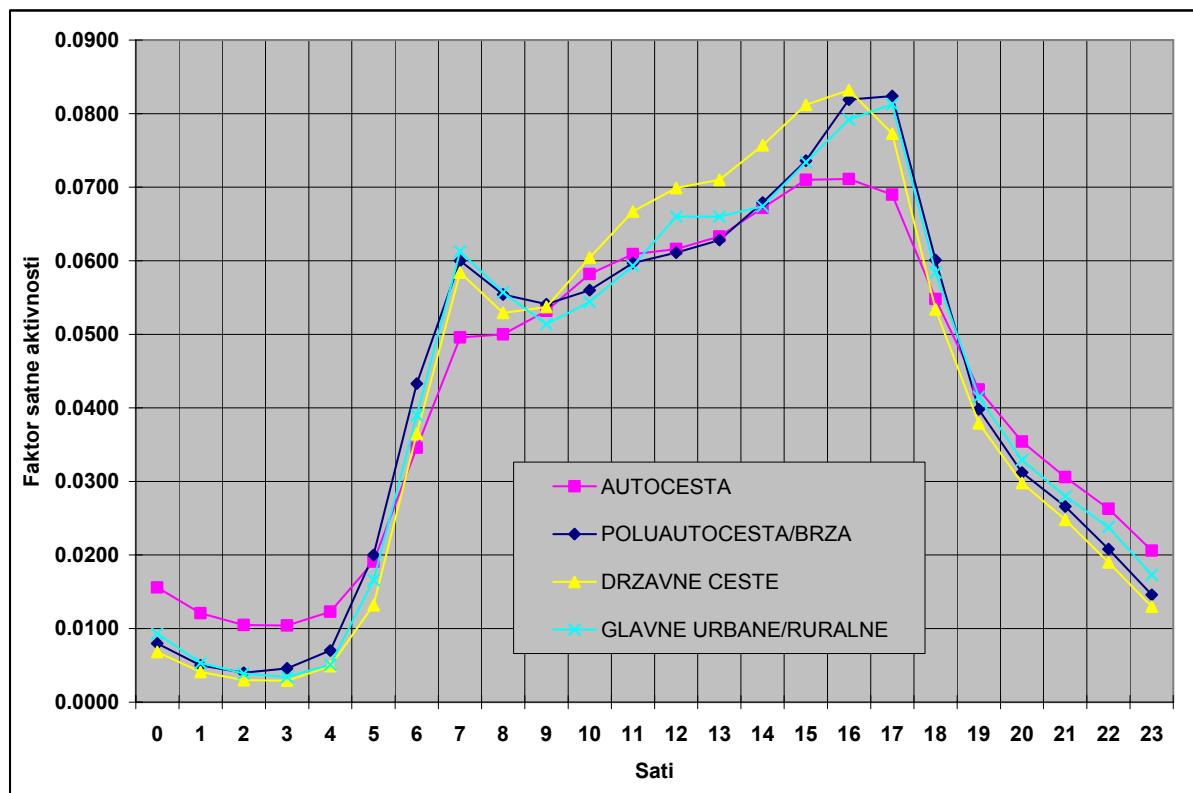
Sl. 4.10 Mjesečni vremenski profili cestovne aktivnosti prikazani za pojedinu kategoriju cesta i vozila (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/ATPRO SMOKE v.2.2 sustava)



Sl. 4.11 Tjedni vremenski profili aktivnosti pojedinih kategorija cesta (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava)

Urbana aktivnost je izraženija tijekom radnog tjedna u odnosu na aktivnost na međugradskim cestama koja je izraženija vikendima.

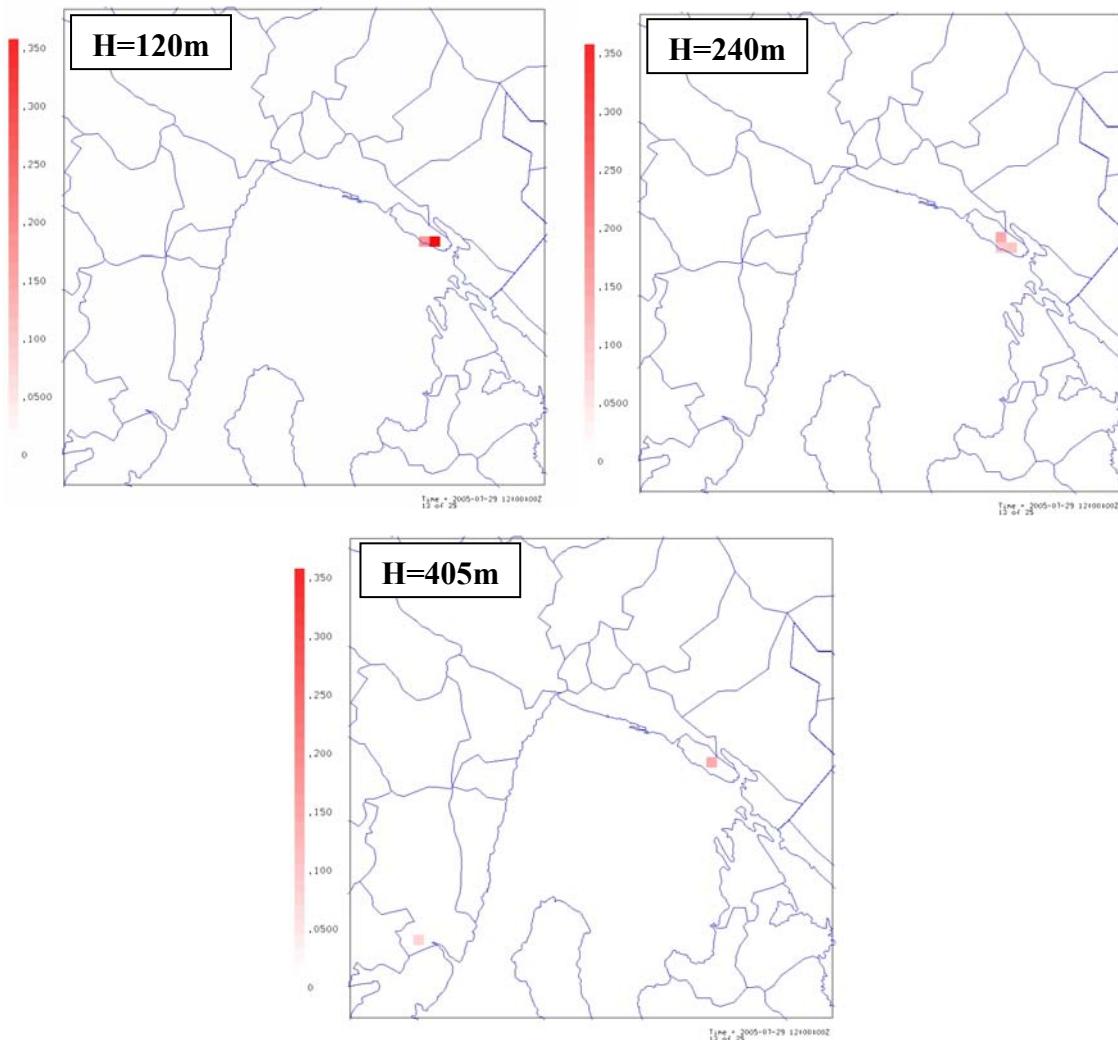
Sl. 4.12 prikazuje trendove dnevnih aktivnosti cestovnog prometa na svakoj kategoriji cesta. Izražen je jutarnji i poslijepodnevni porast aktivnosti uzrokovani prometnim zastojima na svim vrstama cesta, te nešto slabiji na autocestama.



Sl. 4.12 Satni vremenski profili aktivnosti pojedinih kategorija cesta (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava)

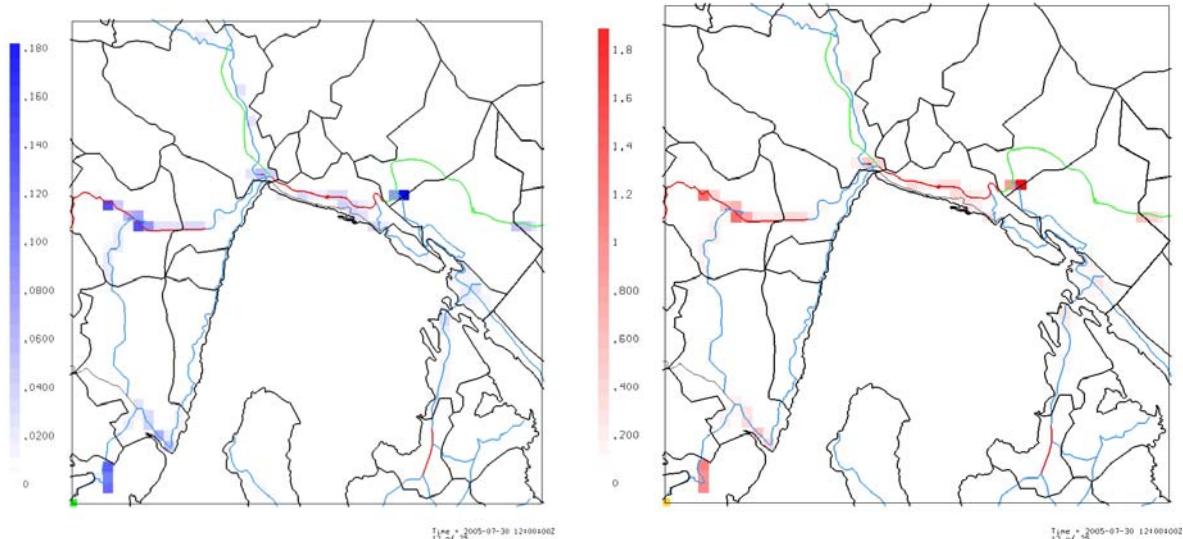
### 4.3 PRIKAZ IZLAZNIH DATOTEKA I DISKUSIJA

Pripremljene su emisije za svaki sat simulacije koja je započela u 0000UTC 27. srpnja 2005. godine i koja je trajala 5 dana kao što je objašnjeno u drugom poglavlju ovoga rada. Računske domene D1 i D2 posjeduju dva različita pristupa pripremi emisija pomoću SMOKE sustava. Šira domena D1 pokriva područje više europskih država te je iz tog razloga korištena europska baza izvora emisija CORINAIR i pripremljena u obliku stacionarnih površinskih izvora emisija unutar SMOKE sustava. Priprema emisija nad manjom domenom D2, zbog finije rezolucije i lokalnog karaktera domene, zahtijevala je pripremu pojedinačnih izvora emisija nad domenom. Pripremljene su emisije najvažnijih točkastih izvora preuzete iz AZO-ovih izvješća o pojedinačnim onečišćivačima u zrak i specijalnim stručnim studijama HEP-a i INA-e. Aktivnosti iz cestovnog transporta sakupljene su i obrađene koristeći informacije iz Hrvatskih cesta te pripremljene u odgovarajućem formatu za SMOKE sustav. Korištenjem SMOKE sustava pripremljene godišnje emisije su prostornom raspodjelom, te vremenskom i kemijskom faktorizacijom emisija, transformirane u satne koncentracije, tj. granične vrijednosti pojedinih kemijskih spojeva kemijskog mehanizma CB-IV CMAQ sustava modeliranja kakvoće zraka nad dvjema računskim domenama.



Slika 4.13 Emisije iz točkastih izvora izražene u mol/s prikazane na tri visinske koordinate 120m, 240m i 405m u 12UTC 30.07.2005. god.

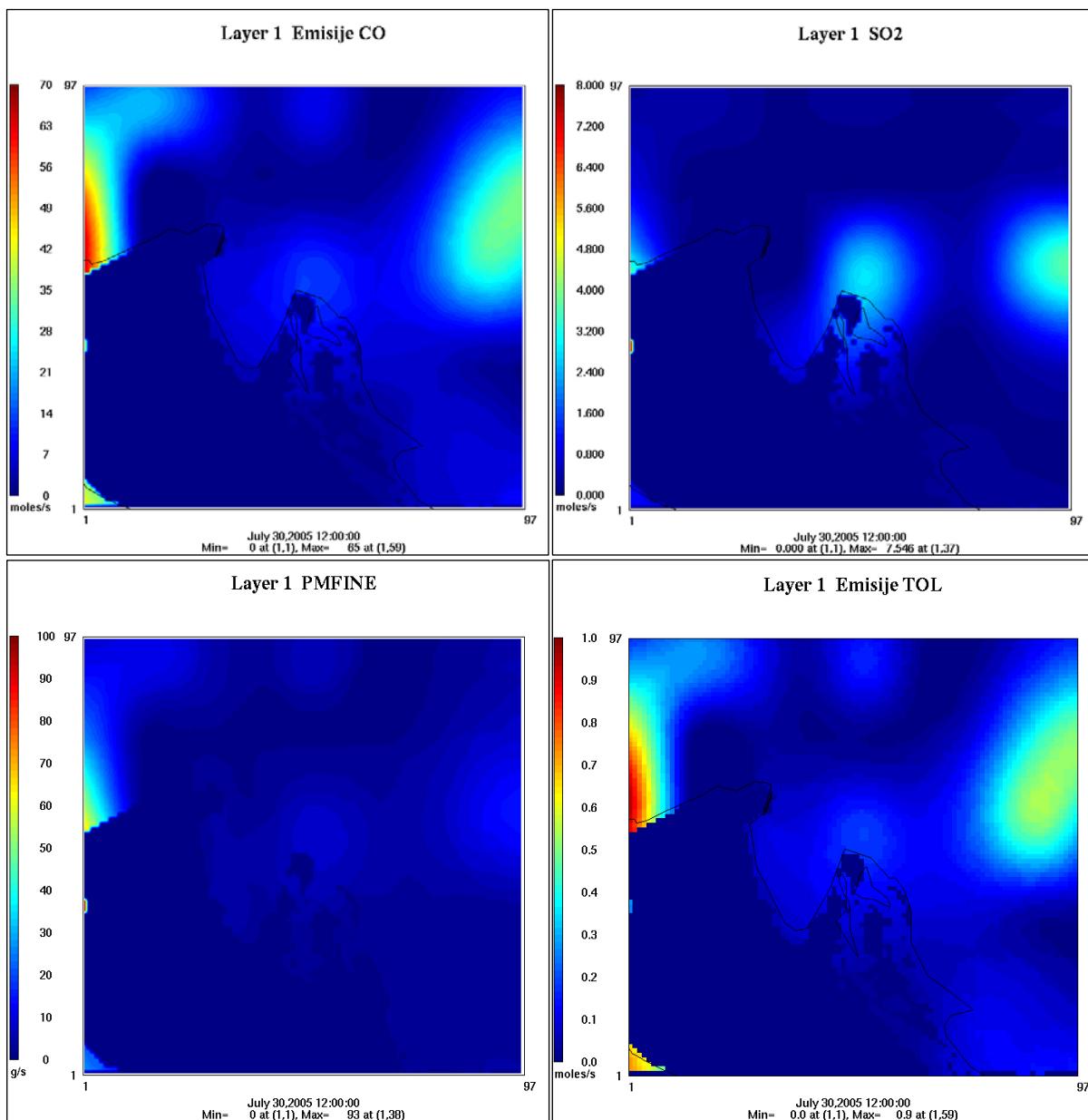
Slika 4.13 prikazuje emisije iz TE Rijeke, TE Plomina i Rafinerije nafte na Urinju pripremljene za domenu finije rezolucije D2. S obzirom na visinu pojedinačnih dimnjaka emisije su raspoređene na više vertikalnih sigma slojeva tijekom SMOKE procesiranja točkastih emisija. Npr. emisije iz TE Plomina uočljive su tek u sloju na 405 m n.z. s obzirom na visinu dimnjaka od 340m n.z., dok se većina emisija na Urinju nalazi emitirana na 120m n.z. iz dvije 1x1km celije računske mreže nad domenom. Emisije na višim visinama od 240m odražavaju, pored emisija iz ispusta TE-a, i predprocesirane vrijednosti na temelju jednadžbi podizanja dima i koeficijenata vertikalne difuzije sve do efektivne visine dizanja dima, odnosno visine miješanja.



**Sl. 4.14 Emisije dušičnog monoksida NO (lijevo) i sumpornog dioksida SO<sub>2</sub> (desno) iz pokretnih izvora nad domenom D2 izražene u mol/s u 1200UTC 30.07.2005. god.**

Emisije iz cestovnog prometa prikazane su na Sl. 4.14 na primjeru emisija NO i SO<sub>2</sub>. za odabrani sat 1200 UTC dana 30.07.2005. god. Emisije nisu jednoliko raspoređene s obzirom na specifičnosti pojedinih dionica cesta i kategorija vozila. Rijetko raspoređena brojila prometa ukazuju na potrebu korištenja mrežnih modela za procjenu prosječnog dnevnog prometa na prometnicama koje nemaju brojila prometa u oba smjera kretanja vozila. U ovom slučaju su korištene ukupne vrijednosti prosječnog godišnjeg dnevnog prometa.

Slika 4.15 prikazuje ukupne emisije svih kategorija izvora nad velikom domenom D1 pripremljene na temelju CORINAIR-ovog nacionalnog inventara emisija kao stacionarni površinski izvori. Prikazane su konture emisija CO, SO<sub>2</sub>, fine čestične tvari PMFINE i toluen TOL predstavnik VOC skupine emisija. Izražene su emisije industrijski razvijenog područja Padove i ušća rijeke Pad u Italiji, industrijska zona Siska i Rijeke u Hrvatskoj. Čestične tvari izražene su u g/s dok su ostale plinovite tvari izražene u mol/s. Emisije su i u ovom slučaju kao i u prethodnim SMOKE rezultatima nad domenom D2 prikazane za odabrani sat 1200 UTC dana 30.07.2005. god.



Slika 4.15 Emisije CO, SO<sub>2</sub>, PMFINE i TOL iz EMEP-ovih kategorija izvora nad domenom D1 prikazanih kao stacionarni izvori. Prikazani izlazni rezultati dani su za 1200UTC 30.07.2005. god.



## 5 MODELIRANJE KAKVOĆE ZRAKA

### 5.1 Uvod

Modeliranje kakvoće zraka općeprihvaćena je zakonski podržana metoda u procjeni onečišćenja zraka, a u svrhu zaštite ljudskog zdravlja i očuvanja okoliša. Tijekom dvadesetog stoljeća većina država svijeta mijenjala je zakone o zaštiti okoliša i zraka te ih prilagođavala novim znanstvenim spoznajama o okolišu, izvorima onečišćenja, njihovim emisijama te samoj dinamici atmosfere. Sazrijevanjem saznanja o utjecajima pojedinih štetnih emisija u okoliš razvijali su se brojni postupci kontrole emisija. Zahtjevalo se da optimalne kontrole emisija omogućuju istovremenu zaštitu okoliša i da budu što jeftinije. Međutim, većina modela tijekom osamdesetih i početka devedesetih godina prošlog stoljeća omogućavala je procjenjivanje pojedinačnih onečišćavala zraka. Među najpoznatijim modelima tadašnjice možemo izdvojiti UAM – *Urban Airshed Model* (Morris and Meyers, 1990.) Eulerov model za procjenu ozona na urbanoj i regionalnoj razini, RADM – *Regional Acid Deposition Model* (Chang i sur. 1987.; Chang i sur. 2000) i ADOM – Acid Deposition and Oxidant Model (Venkatram i sur. 1988.) za procjenu kiselih kiša te STEM – Sulphur Transport and Emission Model (Carmichael and Peters, 1991.) model koji je omogućavao procjenu koncentracija sumpornih oksida i sulfatnih aerosola u atmosferi. Uskoro je postalo jasno kako modeliranje izoliranih onečišćujućih tvari rješava jedan problem, ali istovremeno omogućuje neočekivani rast koncentracija drugih očito međusobno povezanih onečišćujućih tvari. Onečišćujuće tvari su u atmosferi podvrgnute raznovrsnim procesima transporta i transformacija. Takvi procesi uzrokovani su atmosferskim miješanjem i kemijskim reakcijama s različitim kemijskim spojevima čiji je djelomičan opseg prikazan u uvodnom dijelu ovoga dokumenta.

Tijekom devedesetih godina uvode se dopune u zakonskim popisima potencijalnih onečišćavala zraka uključujući vidljivost, fine i grube čestične tvari, neizravna izloženost toksičnim onečišćavala poput teških metala (olovo, žive, itd.) i određenih hlapljivih organskih spojeva. Prema tome pojavila se potreba za izradom modela sposobnih primjeniti napredne znanstvene spoznaje o atmosferskim procesima, te sposobne ukloniti nedostatke postojećih modela, a prvenstveno uvođenjem udruženog modeliranja više onečišćavala istovremeno. Takvi modeli moraju omogućiti procesuiranje različitih informacija, od složenih smjesa emisija i kompleksnih rasporeda izvora, do modeliranja složenih atmosferskih procesa koji transportiraju ovakve smjese u dinamički okoliš, na širokom spektru vremenskih skala, uključujući pritom minute, dane i tjedne. Rezidentno vrijeme određenih onečišćujućih tvari u atmosferi može biti toliko dugo (tjedan dana) da zahtjeva regionalno modeliranje transporta ili toliko kratko da zahtjeva modeliranje finom horizontalnom i vertikalnom rezolucijom modela kako bi se omogućio uvid u fenomene na manjim urbanim ili lokalnim skalam. Takva treća generacija modela kakvoće zraka omogućila je sagledavanje onečišćenosti iz perspektive „jedne atmosfere“<sup>32</sup> koja inherentno uključuje interakciju više onečišćavala istovremeno.

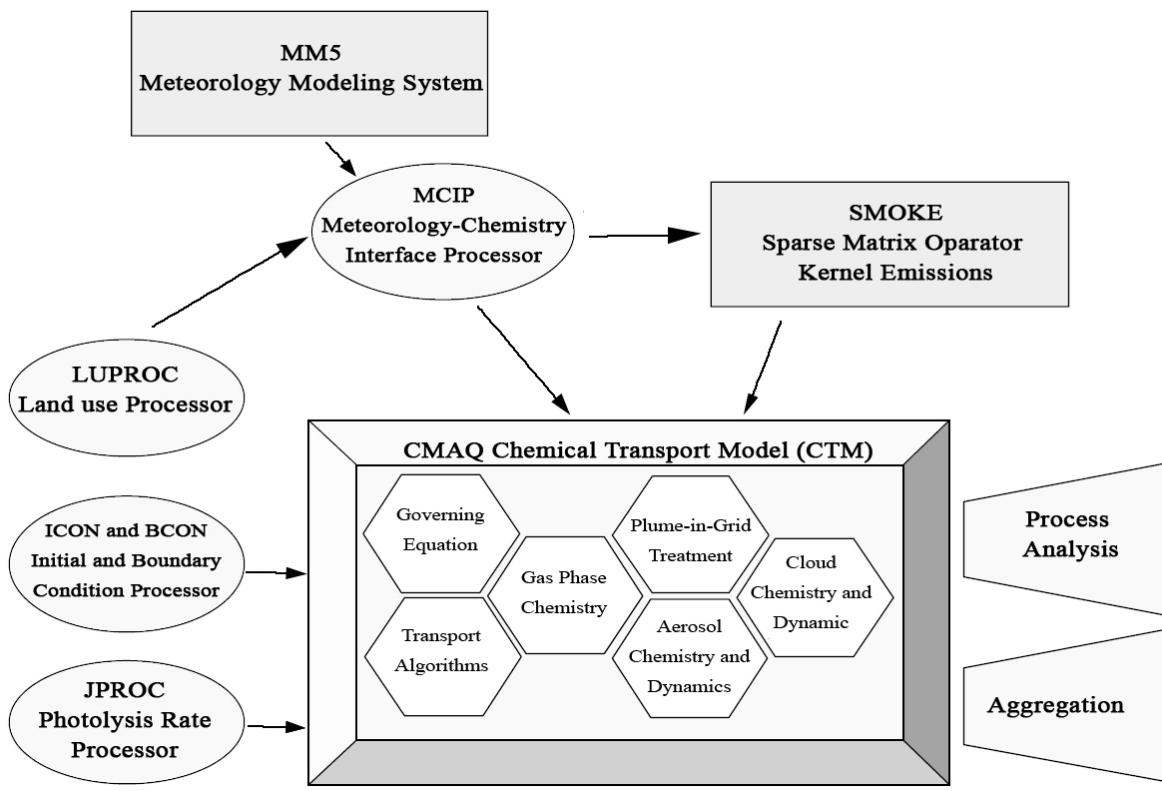
<sup>32</sup> “One atmosphere” – Dennis i sur. 1996., 1998.

## 5.2 CMAQ – sustav za modeliranje kakvoće zraka

CMAQ (*Community Multiscale Air Quality*) je sustav za modeliranje kakvoće zraka temeljen na principu „jedne atmosfere“, a razvijen 1998. god. od strane SAD-ove agencije za zaštitu okoliša EPA-e kako bi omogućio procjenu razine onečišćenja zraka iz izvora emisija kritičnih onečišćavala amandmanski uvrštenih u Zakon o zaštiti zraka tijekom devedesetih godina prošlog stoljeća (CAA-90<sup>33</sup>). Među najvažnijim su onečišćavala, koje zakoni dodatno propisuju, a CMAQ modelira, fotokemijski oksidansi, čestične tvari te taloženje nitratnih, sulfatnih spojeva i teških matala i njihovih spojeva. CMAQ omogućuju višeskalno ugniježđeno modeliranje koncentracije više onečišćavala istovremeno na temelju naprednih znanstvenih postupaka za simulaciju svih atmosferskih i kopnenih procesa koji utječu na transport, transformaciju i taloženje atmosferskih onečišćavala i njihovih prekursora na regionalnim i lokalnim prostornim skalamama tijekom određenog vremenskog perioda.

### 5.2.1 Struktura CMAQ sustava

CMAQ sustav za modeliranje sastoji se od nekoliko pomoćnih pripremnih „procesora“ koji omogućuju pripremu svih rubnih i inicijalnih koncentracija i fotodisocijativne reaktivnosti pojedinih onečišćavala potrebnih za provođenje simulacije CMAQ-ovim kemijskim transportnim modelom CCTM koji, pored ostalih ulaznih veličina, zahtijeva i učitavanje kako početnih emisija onečišćivača, tako i početnog meteorološkog stanja za razmatrano područje.



Sl. 5.1 Struktura CMAQ sustava

Sl. 5.1 ilustrira namjenu svakog od CMAQ procesora i njihovu vezu s kemijskim transportnim modelom gdje strelice prikazuju tijek podataka kroz sustav. S ovom strukturu-

<sup>33</sup> CAA-90 – Clean Air Act Amendments from 1990'

CMAQ sustav zadržava fleksibilnost podržavanja različitih emisijskih sustava i meteoroloških modela, kao i modifikacije postojećih procesora koji direktno pripadaju CMAQ sustavu. U svrhu ovog istraživanja, za odabranu fotokemijski specifičnu epizodu nad referentnim računskim domenama prikupljeni su i pripremljeni emisijski ulazni podaci koristeći SMOKE sustav za procesiranje emisija čiji je cijeli proces opisan u prethodnom poglavlju ovog dokumenta dok su ulazna meteorološka polja pripremljena pomoću MM5 meteorološkog mezoskalnog modela opisanog u trećem poglavlju. S obzirom da CCTM kemijski transportni model omogućuje modeliranje 24-satnih simulacija koristeći sekvencijalni ili paralelni rad računalnog sustava te zahtjeva prethodnu pripremu svih potrebnih ulaznih parametara za svaki dan odabrane epizode izrađena je automatizirana skripta koja modelira cijeli epizodni vremenski period od 27.07. do 31.07. 2005. god. Simulacija je provedena za dvije računske domene prethodno utvrđenih rezolucija i dimenzija tijekom meteorološkog modeliranja gdje je veća domena D1 regionalnog karaktera, a manja ugniježđena domena lokalnog karaktera.

S obzirom na specifičnost pojedinih procesora CMAQ sustava opisat će se rad svakog procesora zasebno.

### **5.2.1.1 MCIP – Meteorološki kemijski procesor**

MCIP pretvara i procesира izlazne datoteke iz meteoroloških modela MM5 u format koji podržava CCTM model. Glavna svrha MCIP procesora je pripremiti odgovarajuće meteorološke veličine i atmosferske parametre u slučaju da iste proslijedene od MM5 sustava nisu konzistentne CCTM modelu te izračunavanje brzine taloženja pojedinih onečišćavala i parametre planetarnog graničnog sloja na temelju površinskih karakteristika dobivenih iz baze iskoristivosti tla LUPROC sustavom ili direktno iz MM5 sustava. Nadalje, jednadžbe očuvanja veličina CCTM modela izražene su u generaliziranim koordinatama kako bi omogućile neovisnost CCTM modela o koordinatnom sustavu ulaznih meteoroloških podataka. MCIP izvršava prilagodbu MM5 izlaznih podataka na generalizirane koordinate te izvršava eventualnu interpolaciju ili masena osrednjjenja kako bi izvršio adaptaciju meteoroloških podataka na novu finiju ili grublju rezoluciju. S obzirom da je ovaj procesor neovisan o samom sustavu CMAQ pretvorba MM5 izlaznih datoteka izvršena je još tijekom meteoroloških modeliranja kao njezin posljednji korak s obzirom da MCIP verziju izlaznih MM5 datoteka koristimo i u pripremi SMOKE izlaznih emisijskih datoteka te pri analizi i vizualizaciji.

### **5.2.1.2 JPROC – Procesor parametara fotodisocijacije**

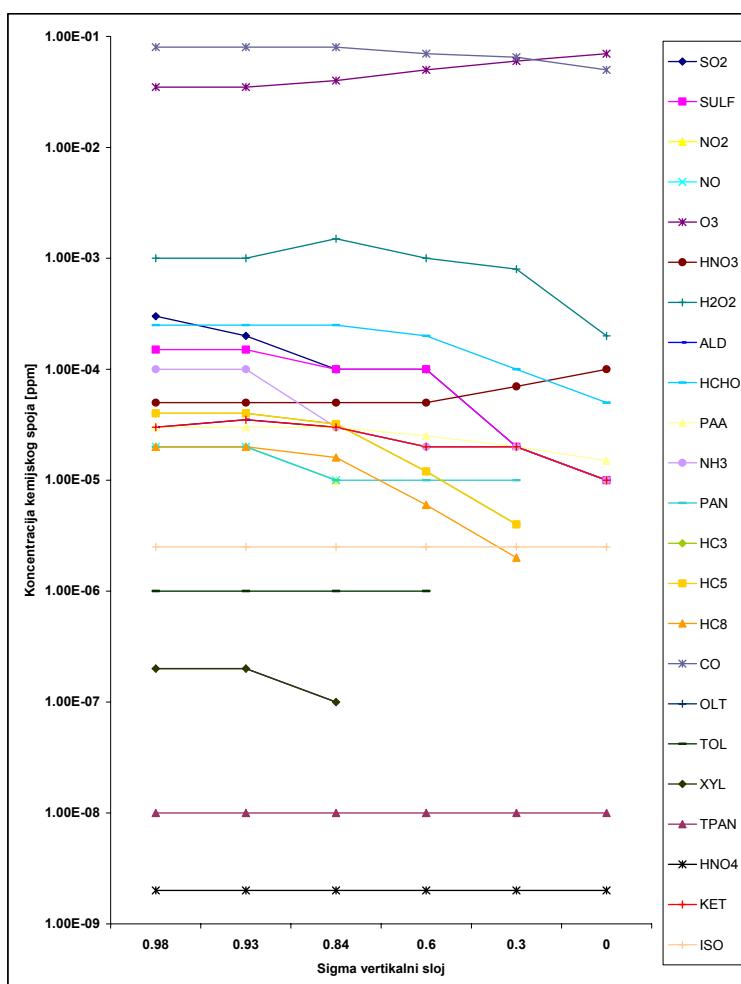
JPROC procesor izračunava reaktivnu mjeru fotodisocijacije pojedinih fotolitičkih reakcija koje obrađuje CCTM model. Fotodisocijacija je objašnjena u uvodnom dijelu ovog dokumenta pri opisu troposferskih kemijskih procesa. JPROC zahtjeva poznavanje vertikalnih profila ozona dostavljenih na temelju TOMS<sup>34</sup> vertikalnih ozonskih kolona, temperaturnog i tlačnog vertikalnog profila i površinskog albeda Zemlje preuzetog iz MM5 meteoroloških podataka. Međutim, većinu informacija potrebnih za izračun mjerne fotodisocijativnosti pojedine kemijske reakcije preuzima iz tablica eksperimentalno izmjerениh apsorpcijskih poprečnih presjeka, kvantne korisnosti i aktiničnog fluksa, a na temelju njihove ovisnosti o međusobnom položaju Zemlje i Sunca, temperaturnim i tlačnim

<sup>34</sup> TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometer –instrument na satelitima u polarnoj orbiti Zemlje sinkroniziranih sa Sunčevim kretanjem kako bi pratili sunčevu radijaciju prema Zemlji (Nimbus-7 1978-1993, Meteor-3 1991-1994, ADEOS 1996-1997, Earth Probe 1996-2006)

vertikalnim profilima i valnoj duljini. Unutar CCTM sve se kemijske reakcije izvode iz parametarskih tablica mjera fotodisocijativnosti generiranih JPROC procesorom za čistu atmosferu i korigiranih ovisno o udjelu naoblake nad promatranim geografskim područjem računskih domena za svaki pojedini dan simulacije.

### 5.2.1.3 ICON i BCON – Procesor inicijalnih i rubnih koncentracija onečišćujućih tvari

ICON i BCON procesori osiguravaju vertikalne inicijalne i granične vrijednosti početnih koncentracija kemijskih sudionika CCTM kemijskog mehanizma. Ovi procesori omogućuju inicijalizaciju domena za prvi dan simulirane epizode koristeći predefinirane vertikalne profile pozadinskih koncentracija onečišćavala, odnosno koncentracija čiste atmosfere te inicijalizaciju svih ostalih ugniježđenih domena finijih rezolucija na temelju rezultata trodimenzionalnih simulacija, CCTM modelom, većih domena kojima pripadaju. Inicijalizacija se također izvršava koristeći rezultate prethodnog dana za inicijalizaciju sljedećeg dana promatrane epizode za sve simulirane domene. Inicijalizacija prvog dana simulacije provodi se na temelju prosječnih mjerjenih vrijednosti koncentracija pojedinih kemijskih spojeva u relativno čistoj atmosferi umjerenog pojasa istočnog dijela Sjedinjenih Američkih Država. S obzirom na sličnost klimatskih uvjeta moguće je zaključiti kako europski vertikalni profili ne odstupaju od američkih te se takvi profili uzimaju kao referentni za inicijalizaciju početnih pozadinskih koncentracija nad odabranim računskim domenama.



Sl. 5.2 Prikaz vertikalnih profila stabilnih pozadinskih koncentracija pojedinih kemijskih spojeva čiste atmosfere umjerenog geografskog pojasa

### 5.2.2 CCTM - Kemijski transportni model

CMAQ-ov kemijski transportni model CCTM simulira fizikalno-kemijske atmosferske procese kako bi odredio trodimenzionalna polja koncentracija različitih onečišćavala zraka pri tome koristeći za njega pripomljena meteorološka polja i emisije iz prizemnih izvora onečišćenja te ostale inicijalne i granične uvjete dostavljene ICON, BCON i JPROC CMAQ procesorima. Model CCTM sastoji se od četiri neodvojiva dijela koja u konačnici dovode do ciljanih rezultata, polja koncentracija onečišćavala. Prvi dio čine pretpostavke i aproksimacije na temelju kojih se fizikalni problem pretvara u idealizirani problem koji i dalje zadržava svojstva stvarnog problema. Drugi dio predstavlja postavljanje matematičkog modela i pomoćnih uvjeta i jednadžbi koji opisuju idealizirani fizikalni ili kemijski sustav. Treći dio čine računalne numeričke sheme kojima se matematičke relacije prevode u oblik koji je moguće riješiti. Posljednji dio modela CCTM čini sam rješavač sustava jednadžbi.

Jedna od glavnih pretpostavki na temelju koje se bazira CCTM kemijski transportni model je činjenica da je koncentracija onečišćavala u atmosferi neznatna (reda veličine  $\mu\text{g m}^{-3}$  ili  $\text{mg m}^{-3}$ ) u usporedbi s koncentracijom zraka i vodene pare te da njihova prisutnost ne utječe na regionalne ili lokalne meteorološke prilike. Prema tome, opravdano je rješavati transportne jednadžbe pojedinih sudionika neovisno od Navier-Stokesovih i energetskih jednadžbi korištenih u meteorološkim modelima. Primjeri mogućih utjecaja onečišćavala na atmosfersku dinamiku su promjene temperaturnih polja utjecajem generirane topline atmosferskih kemijskih reakcija ili u situacijama kada je atmosferski sloj obogaćen povišenom koncentracijom određenih onečišćavala čime se mijenja apsorpcija i refleksija sunčevog zračenja, odnosno bilanca zračenja, te time i izmjena strujanja zraka. U tom slučaju, rješavanje konstitutivnih jednadžbi zahtjevalo bi mnogo veću numeričku rezoluciju i kompleksnost sustava jednadžbi.

Temeljen na generaliziranim koordinatama CCTM omogućuje prilagodbu većini uobičajenih koordinatnih sustava meteoroloških modela te prilagodbu formulaciji pojedinog fizikalnog procesa u njemu odgovarajućem koordinatnom sustavu. Na primjer, parametrizacija planetarnog graničnog sloja temeljena je na geometrijskoj visini ili bezdimenzionalnoj visinskoj skali dok je za parametrizaciju konvektivnih procesa u oblacima pogodnija vertikalna raspodjela prema slojevima tlaka. Poveznicu između generaliziranih koordinata parametrizacije fizikalnih procesa i glavnih jednadžbi očuvanja predstavlja koordinatna transformacija korištenjem Jakobijeve matrice. CMAQ sustav koristi kao vertikalnu koordinatu bezdimenzionalnu veličinu prilagodljivu terenu te njenu pripadnu Jakobijanu, istovjetnu vertikalnoj koordinati MM5 meteorološkog modela.

Vremenski promjenjiva polja koncentracija opisuje sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi (5.1) očuvanja mase pojedinog kemijskog sudionika atmosferskih procesa (Vankatram, 1993.)

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial(\bar{\rho}_i J_\xi)}{\partial t} + m^2 \nabla_\xi \bullet \left( \frac{\bar{\varphi}_i \hat{V}_\xi J_\xi}{m^2} \right) + \frac{\partial \bar{\varphi}_i \hat{v}^3 J_\xi}{\partial \hat{x}^3} \\
 (a) & \qquad (b) \qquad \qquad (c) \\
 & -m^2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}^1} \left[ \frac{\bar{\rho} J_\xi}{m^2} (\hat{K}^{11} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^1}) \right] - m^2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}^2} \left[ \frac{\bar{\rho} J_\xi}{m^2} (\hat{K}^{22} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^2}) \right] - \frac{\partial}{\partial \hat{x}^3} \left[ \bar{\rho} J_\xi (\hat{K}^{33} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^3}) \right] \\
 (d) & \qquad \qquad \qquad (e)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -m^2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}^1} \left[ \frac{\bar{\rho} J_\xi}{m^2} (\hat{K}^{13} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^3}) \right] - m^2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}^2} \left[ \frac{\bar{\rho} J_\xi}{m^2} (\hat{K}^{23} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^3}) \right] \\
 & \quad (f) \\
 & - \frac{\partial}{\partial \hat{x}^3} \left[ \bar{\rho} J_\xi (\hat{K}^{31} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^1} + \hat{K}^{32} \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^2}) \right] \\
 & \quad (g) \\
 & = J_\xi R_{\varphi_i}(\bar{\varphi}_1, \dots, \bar{\varphi}_N) + J_\xi Q_{\varphi_i} + \frac{\partial(\bar{\varphi}_i J_\xi)}{\partial t} \Big|_{cld} + \frac{\partial(\bar{\varphi}_i J_\xi)}{\partial t} \Big|_{aero} + \frac{\partial(\bar{\varphi}_i J_\xi)}{\partial t} \Big|_{ping}, \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

(h)              (i)              (j)              (k)              (l)

gdje je:

- $i$  pojedini kemijski sudionik atmosferskih kemijskih reakcija koje obrađuje CCTM odnosno kemijski mehanizam CarbonBond-IV;
- $\varphi_i$  koncentracija kemijskog sudionika  $i$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ];
- $\hat{x}^1, \hat{x}^2, \hat{x}^3$  generalizirane koordinate;
- $\hat{\xi}$  vertikalna teren prateća koordinata monotono rastuća s visinom;
- $\bar{V}_\xi$  horizontalne komponente brzine;
- $\dot{\bar{\xi}} = d\xi / dt = \dot{\xi}$  vertikalna brzina;
- $J_\xi$  vertikalna Jakobijana za terenu prilagodljiv koordinatni sustav;
- $m$  projektivni kartografski faktor;
- $\bar{q}_i = \bar{\varphi}_i / \bar{\rho}$  srednji maseni udio pojedinog onečišćavala (sudionika);
- $\bar{\rho}$  srednja gustoća (koncentracija) zraka;
- $\hat{K}^{11}, \hat{K}^{22}, \hat{K}^{33}$  dijagonalne komponente tenzora turbulentne difuzivnosti  $\hat{K}$ ;
- $\hat{K}^{13}, \hat{K}^{23}, \hat{K}^{31}, \hat{K}^{32}$  nedijagonalne komponente tenzora turbulentne difuzivnosti  $\hat{K}$

Fizikalni procesi koje opisuje jednadžba (5.1) i njima pripadni CCTM moduli sažeto su slijedom prikazani :

- (a) vremenska promjena koncentracije onečišćavala - *DRIVER*,
- (b) horizontalna advekcija - *HADV*,
- (c) vertikalna advekcija - *VADV*,
- (d) horizontalna turbulentna difuzija (dijagonalni član) - *HDIFF*,
- (e) vertikalna turbulentna difuzija (dijagonalni član) - *VDIFF*,
- (f) horizontalna turbulentna difuzija (nedijagonalni član) – izostavljeno iz CCTM-a,
- (g) vertikalna turbulentna difuzija (nedijagonalni član) – izostavljeno iz CCTM-a,
- (h) stvaranje ili nestajanje plinovitih onečišćavala uslijed kemijskih reakcija - *CHEM*,
- (i) emisije onečišćavala – *EMIS* (dio *VDIFF* i/ili *CHEM* modula),
- (j) stvaranje ili nestajanje tekućih onečišćavala uslijed miješanja oblaka i kemijskih procesa u oblacima - *CLOUD*,
- (k) stvaranje ili nestajanje onečišćavala uslijed aerosolnih procesa - *AERO*, i
- (l) stvaranje ili nestajanje onečišćavala prilikom procesa širenja perjanice dima uslijed emisija onečišćujućih tvari iz točkastih izvora - *PING*.

CCTM ne procesira emisije *EMIS* kao individualne procese, već ih pridružuje procesima vertikalne difuzije ili kemijskim procesima plinovitih spojeva u obliku izvora pojedinih sudionika reakcija.

Međutim, parametrizaciju te definiciju određenih članova jednadžbe objasnit ćemo u nastavku s obzirom da je mjera promjene koncentracija njihovim djelovanjem od izrazitog značaja za nastanak fotooksidativnih onečićavala poput ozona, određenih skupina sekundarnih aerosola i dr.

### 5.2.2.1 Horizontalna i vertikalna advekcija

S obzirom da su srednja atmosferska strujanja nad velikim prostornim skalamama kvazihorizontalna s obzirom na Zemljinu površinu, procesi koji opisuju atmosfersko strujanje mogu se razdvojeno promatrati u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Vertikalno strujanje je isključivo proizvod interakcije atmosferske dinamike i termodinamike. S obzirom na ovu pretpostavku procesi advekcije podijeljeni su na horizontalne i vertikalne komponente. Kao i ostali procesi, tako se i pojedini advekcijski procesi temelje na očuvanju mase, osnovnoj karakteristici jednadžbe kontinuiteta, te rješavaju odvojeni jedan od drugog.

$$\frac{\partial(\bar{\varphi}_i J_\xi)}{\partial t} = -m^2 \nabla_\xi \cdot \left( \frac{\bar{\varphi}_i \hat{V}_\xi J_\xi}{m^2} \right) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\varphi}_i J_\xi)}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{\varphi}_i \hat{v}^3 J_\xi}{\partial \hat{x}^3} \quad (5.3)$$

Vertikalni advektivni član rješava se uz granični uvjet  $\hat{v}^3 = 0$  na dnu i vrhu računske domene. Primjenjeno umjetno odvajanje advektivnih procesa uvodi se isključivo kako bi se za svaku pojedinu komponentu mogle primijeniti različite numeričke sheme i vremenski koraci sukladno generaliziranim koordinatama. U stvarnosti trebalo bi ih promatrati integralno.

Sukladno Byun i Pleim, 2000., autorima CCTM kemijskog transportnog modela, PPM – *Piecewise Parabolic Method* (Collella i Woodward, 1984.) predstavlja robusnu numeričku shemu primjenjivu na simulacije s više onečićivača pri različitim vremenskim uvjetima te, prema tome, korisnu za diskretizaciju horizontalnog advektivnog člana. PPM distribuira koncentraciju u centroidu celije paraboličnom krivuljom za svaku pojedinu celiju na temelju vrijednosti koncentracija na rubovima celije. Iako ova shema generira nešto veću numeričku difuziju, njezina monotonost je vrlo pogodna za modeliranje fotokemijskih procesa (Byun i sur. 1999).

Diskretizacija vertikalnog advektivnog člana je identična horizontalnoj jednodimenzionalnoj PPM shemi izraženoj u odgovarajućoj generaliziranoj vertikalnoj koordinati.

### 5.2.2.2 Horizontalna i vertikalna difuzija. Suha depozicija

Podjela atmosferskih difuzivnih procesa na horizontalne i vertikalne u CCTM-u izvršena je, kao i u slučaju advekcije, iz praktičkih razloga. Vertikalna difuzija uglavnom predstavlja izmjenu energije između zraka i zemljine površine te njihov termodinamički utjecaj na atmosfersku turbulenciju. Horizontalna difuzija, međutim predstavlja miješanje na

podmrežnoj razini (subgrid scale) uslijed nedovoljne horizontalne rezolucije i nerazlučene fluktuacije vjetra.

Većina modela kakvoće zraka odbacuje nedijagonalne članove turbulentne difuzije poput članova (f) i (g) iz jednadžbe (5.1) na temelju njihovog slabog utjecaja. Međutim, u područjima izrazito velikih terenskih gradijenata poput topografski kompleksne Rijeke potrebno je računati i poprečno usmjerene difuzivne članove.

Jednadžbe očuvanja za svaku komponentu difuzije izražene su pomoću masenih udjela  $q_i$ , a ne pomoću koncentracije sudionika  $\varphi_i$ . Ovakav pristup je pogodniji za numeričku diskretizaciju turbulentnog fluksa s obzirom da većina primjenjivih shema koristi parametrizaciju turbulentnog fluksa u odnosu na konzervativne veličine poput masenog udjela  $q_i$ .

Jednadžba očuvanja masenog udjela za horizontalnu difuziju glasi

$$\frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} \Big|_{hdif} = -\hat{\nabla}_{\xi} \bullet [\hat{\mathbf{F}}_{q_i}] - \hat{\mathbf{F}}_{q_i} \bullet \hat{\nabla}_{\xi} [\ln(J_{\xi} \bar{\rho})], \quad (5.4)$$

a za vertikalnu difuziju

$$\frac{\partial \bar{q}_i}{\partial t} \Big|_{vdif} = -\frac{\partial \hat{F}_{q_i}^3}{\partial \hat{x}^3} + \left( \frac{Q_{\varphi_i}}{\bar{\rho}} \right) - \hat{F}_{q_i}^3 \frac{\partial [\ln(J_{\xi} \bar{\rho})]}{\partial \hat{x}^3} - \frac{v_d}{h_{dep}} \bar{q}_i \Big|_{sloj1}, \quad (5.5)$$

gdje je

- $q_i$  - maseni udio pojedinog onečišćavala ( $q_i = \varphi_i / \bar{\rho}$ )
- $\hat{\mathbf{F}}_{q_i}, F_{q_i}^3$  - horizontalna i vertikalna komponenta Reynoldsovog turbulentnog fluksa  $\hat{F}_{q_i}^l = -\hat{K}^l \frac{\partial \bar{q}_i}{\partial \hat{x}^l}$ ,  $l = 1, 2, 3$
- $Q_{\varphi_i} / \bar{\rho}$  - vremenska promjena masenog udjela uslijed emisije sudionika  $i$
- $v_d$  - brzina suhe depozicije predstavlja granični uvjet dna domene, odnosno prvog sloja vertikalne generalizirane koordinate  $\hat{x}^3$
- $h_{dep}$  - visina prvog sloja vertikalne generalizirane koordinate  $\hat{x}^3$

Emisije su, kao što je vidljivo, pridružene jednadžbi (5.5) za vertikalnu difuziju, kao i suha depozicija u obliku donjeg graničnog uvjeta. U svim Eulerovim modelima kakvoće zraka depozicija je prikazana kao utjecaj na koncentraciju u najdonjem vertikalnom sloju kao rubni uvjet fluksa.

Kako bi zatvorili sustav jednadžbi, uvedena je metoda turbulentne difuzivnosti (Stull, 1988.), tkz. lokalna *K-teorija* prvog reda za turbulentni fluks. K-teorija je metoda kojom se postiže proporcionalnost između kinetičkog turbulentnog fluksa koncentracije  $\varphi_i$  i njezinog odgovarajućeg gradijenta prema jednadžbi (5.6) (Jacobson, 1999.):

$$\overline{\varphi_i'' \hat{u}_{\xi}} = -K^{1l} \frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial \hat{x}^l}; \overline{\varphi_i'' \hat{v}_{\xi}} = -K^{2l} \frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial \hat{x}^l}; \overline{\varphi_i'' \hat{v}'^3} = -K^{3l} \frac{\partial \bar{\varphi}_i}{\partial \hat{x}^l} \quad (5.6)$$

Turbulentna difuzivnost  $K$  parametrizirana je teorijom sličnosti planetarnog graničnog sloja pri čemu su korišteni parametri poput Monin-Obukove duljine ili Richardsonovog broja na temelju kojih se određuje stabilnost pojedinih slojeva atmosfere.

K-teorija prepostavlja da je daljinska skala procesa difuzije mnogo manja (maleni vrtlozi) nego određena duljina miješanja duž koje se koncentracija i srednja brzina mijenjaju. To nije

uvijek slučaj kao u primjeru nestabilne situacije s jakom vertikalnom konvekcijom u graničnom sloju. Postoje metode zatvaranja sustava jednadžbi višeg reda poput TKE koje daju bolje rezultate, ali su računski daleko skuplje i zbog toga u operativnim modelima kakvoće zraka neupotrebljive.

### 5.2.2.3 Aerosolni procesi

CCTM implementira aerosolni modul iz Regional Particulate Model modela (Binkowski i Shankar, 1995.) Primarne čestice se dijele na fine i grube čestice. Fine čestice su rezultat procesa izgaranja i procesa sekundarne proizvodnje čestica, a grupa grubih čestica se sastoji od materijala kao što je vjetrom nošena prašina i morske čestice soli. Ključni aerosolni procesi koje obrađuje CCTM su:

- suha depozicija grubih čestica aerosola,
- interakcija aerosola s oblačnim kapljicama te njihova depozicija uslijed precipitacije,
- stvaranje novih čestica uslijed homogene nukleacije u sustavu sulfatne kiseline i vodene pare,
- proizvodnja organskih aerosola na temelju plinovitih prekursora, te
- koagulacija čestica i rast uslijed kondenzacije.

Vremenska promjena koncentracije uzrokovana aerosolnim procesima implementira metodu frakcijskog vremenskog koraka te glasi

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = R_{aero_i}(\bar{\varphi}_1, \dots, \bar{\varphi}_N) + Q_{aero_i} - \hat{v}_g \frac{\partial \varphi_i}{\partial \xi} \quad (5.7)$$

gdje je

$R_{aero_i}$  - procesi kao što su formiranje novih čestica te rast i taloženje postojećih,

$Q_{aero_i}$  - svi ostali vanjski izvori i ponori

$\hat{v}_g$  - kontravarijantna brzina sedimentacije

### 5.2.2.4 Ostali procesi

Procesi miješanja oblaka uvelike doprinose izmjeni koncentracije pojedinih onečišćavala putem vlažnog taloženja koji uvelike ovisi o količini i pojavnosti precipitacija te o koncentraciji vode u oblacima. Algoritam koji koristi CCTM pri izračunu satno akumuliranog vlažnog taloga preuzet je iz RADM-a (Chang i sur., 1987.).

CCTM posjeduje tehniku modeliranja kemijskih procesa i dinamiku perjanice dima pojedine emisije iz industrijskih i inih dimnjaka. Metoda Plume-in-Grid sastoji se od modela dinamike perjanice i modula Lagranžeove reaktivne perjanice. Kako bi se emisije pojedinih točkastih izvora modelirale koristeći PING metodu, CCTM zahtijeva pripremljene podatke od strane SMOKE sustava. Kriterij odabira dimnjaka, koji zadovoljavaju da budu procesirani PING metodom (Gillani i Godovich, 1999.), je donji prag dnevne emisije od 50 tona. S obzirom da ovom kriteriju ne udovoljava niti jedan od promatranih točkastih izvora u Riječkom zaljevu ova metoda nije korištena pri provođenju CCTM simulacije.

### 5.2.3 Reakcije plinovitih spojeva. Carbon-Bond IV kemijski mehanizam

S obzirom da atmosferska kemija igra značajnu ulogu u većini problema zagađenja zraka, esencijalno je poznavati i pravilno prikazati kemijske interakcije među atmosferskim onečišćavala u modelu kakvoće zraka. U proračun je potrebno je uključiti sva onečišćavala i njihove kemijske transformacije značajne za fizikalni problem kako bi se postigla točna prognoza koncentracije okolišnih onečišćivača. Mnogi od atmosferskih onečišćavala ili njihovih prekursora emitirani su kao plinovi i većinom reagiraju u plinovitoj fazi. Međutim, neki od najvažnijih atmosferskih procesa kao što su kisele kiše i nastanak sekundarnih aerosola nastaju interakcijom kemijskih sudionika reakcija u plinovitoj, tekućoj i krutoj fazi. Prema tome potrebno je modelirati procese među svim trima fazama. To nije slučaj u većini modela kakvoće zraka gdje su procesi pojedinih faza modelirani odvojeno budući da je takav pristup računalno efikasniji. Takav pristup je primijenjen i u CCTM modelu CMAQ sustava modeliranja kakvoće zraka.

Carbon-Bond mehanizam CB-IV je strukturalni tip mehanizma koji koristi devet primarnih organskih plinovitih spojeva. Većina organskih onečišćavala u ovom mehanizmu predstavljaju spojevi ugljičnih veza, dok su eten (ETH), izopren (ISOP) i formaldehid (FORM) tretirani odvojeno. Ugljični spojevi koje CBM-IV modelira su *parafin* (PAR) s jednostrukom vezom, *olefin* (OLE) s dvostrukom vezom, *toluen* (TOL) sa sedmerostrukukom prstenastom ugljičnom strukturom, *ksilen* (XYL) s osmerostrukom prstenastom ugljičnom strukturom, acetaldehydi i neki viši aldehydi (ALD2) te nereaktivni ugljikov atom (NR). Mnogo organskih spojeva je pridruženo kategoriji spojeva s ugljikovom vezom isključivo na temelju molekularne strukture, ali neki su pridruženi i uslijed njihove velike reaktivnosti.

CBM-IV mehanizam doživio je tijekom devedesetih godina velike izmjene od svoje prve publikacije (Gery i sur. 1989.). U osnovnoj verziji sadrži 36 reaktanata i 93 reakcije uključujući 11 fotolitičkih reakcija. Ugrađeni su dodaci na postojeći kemijski mehanizam tako da su dodavani novi procesi i kemijski sudionici reakcija. Na takav način su pridodane aerosolna ekstenzija, ekstenzija izoprena, ekstenzija kemije tekuće faze, procesi isparavanja morskih čestica, itd. o kojima je više riječi u znanstvenoj dokumentaciji CMAQ modela.

Kemijski procesi plinovitih spojeva određuju promjenu koncentracije pojedinog onečišćavala na temelju sljedećeg općeg oblika vremenske promjene koncentracije:

$$\left. \frac{\partial \varphi_i^*}{\partial t} \right|_{chem} = J_\xi R_{\varphi_i}(\bar{\varphi}_1, \dots, \bar{\varphi}_N) + J_\xi Q_{\varphi_i} \quad (5.8)$$

CMAQ koristi generalizirane kemijske rješavače QSSA<sup>35</sup> (Young i sur. 1993.) i SMVGEAR<sup>36</sup> (Jacobson i Turco, 1994.) koji rješavaju nelinearni sustav gustih običnih diferencijalnih jednadžbi (5.8). QSSA se pokazao kao vrlo brz i efikasan rješavač nešto slabije točnosti od SMVGEAR algoritma koji zahtijeva više računalnih resursa te nudi kvalitetniji rezultat.

<sup>35</sup> QSSA – Quasi-Steady State Approximation method

<sup>36</sup> SMVGEAR – Sparse-Matrix Vectorized Gear algoritm.

### 5.3 Prikaz rezultata

Simulacija je provedena za period od 27. do 31. srpnja 2005. godine nad dvjema domenama za koje postoje mjereni podaci o onečišćavala zraka i nad kojima je evidentirana snažna fotoreaktivnost<sup>37</sup>. MM5-SMOKE-CMAQ sustavom provedena su 24-satne simulacije kakvoće zraka s inicijalizacijama u 0000UTC za svaki dan epizode. Šira domena D1, centrirana nad Kvarnerskim zaljevom s horizontalnom rezolucijom od 3 km i 18 vertikalnih slojeva, pokriva područje od  $350 \text{ km}^2$ . Inicijalni i granični uvjeti za finiju ugniježđenu domenu D2 interpolacijom su nametnuti iz rezultata netom provedene simulacije nad domenom D1. Domena D2 pokriva šire riječko područje od  $50 \text{ km}^2$  fine horizontalne rezolucije od 1 km i 18 neravnomjerno raspoređenih vertikalnih slojeva ugušenih prema dnu domene (terenu).

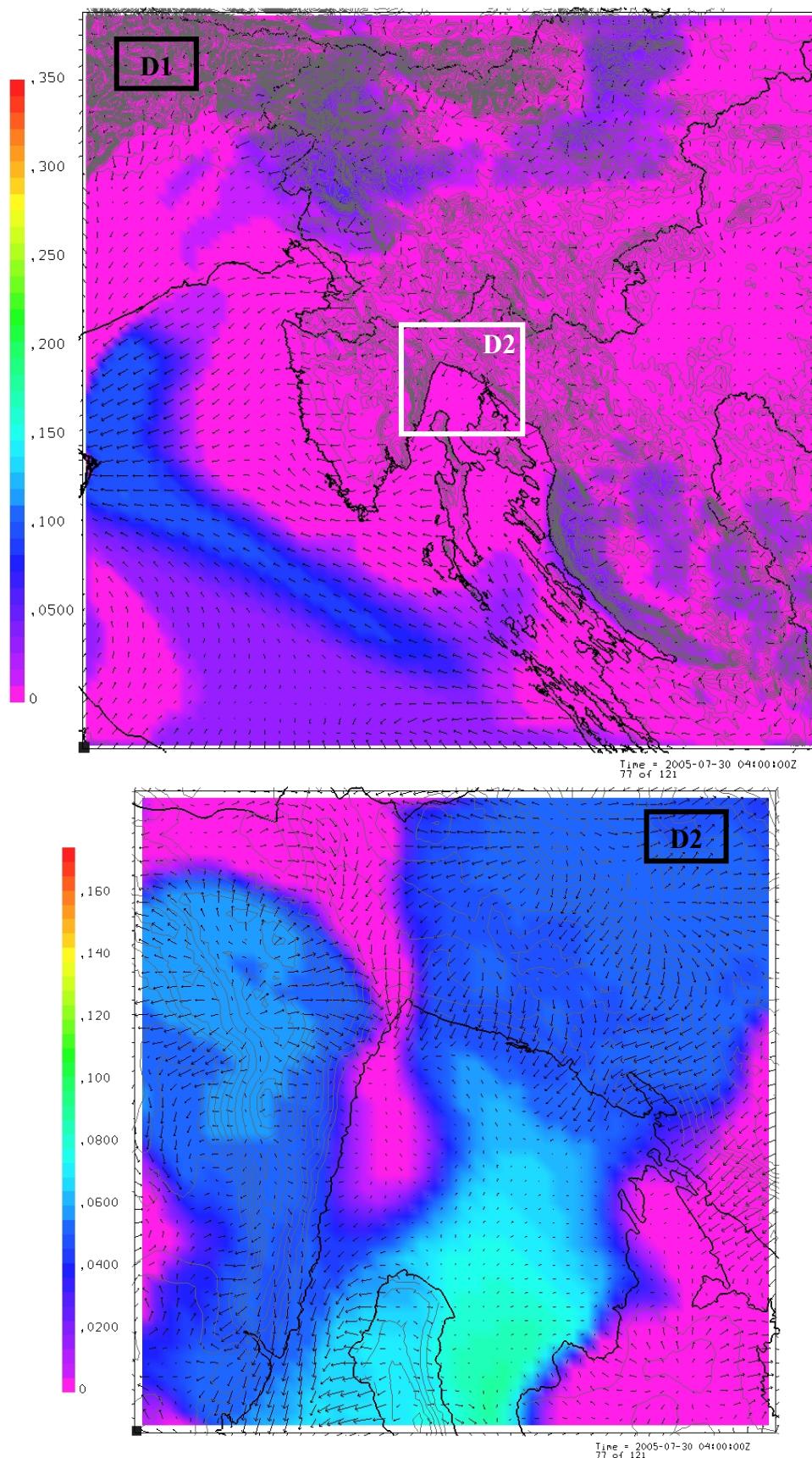
Razvoj strujnog polja i polja koncentracija fotokemijskih onečišćavala prikazani su na Sl. 5.5 i Sl. 5.6 za  $\text{O}_3$  i  $\text{NO}_2$  nad domenom D1 te na Sl. 5.7 i Sl. 5.8 za  $\text{O}_3$  i  $\text{NO}_2$  nad domenom D2 tijekom 24-satnog ciklusa 30. srpnja 2005. godine nad Sjevernim Jadranom.

Noćni režim (Sl. 5.3) karakteriziraju katabatički i planinski vjetrovi koji se pojavljuju uz sva veća planinska područja te potiskuju koncentracije onečišćavala prema moru ili, u kontinentalnom dijelu, prema nizinama (Lika, slovenski Kras). S obzirom na kompleksnu orografiju istarski poluotok i Kvarner zajednički utječu na stvaranje kopnenjaka, uslijed hlađenja kopna, i na advekciju onečišćavala prema otvorenom Jadranu gdje uslijed obalne cirkulacije s talijanske i hrvatske obale dolazi do akumulacije preostalih fotooksidativnih onečišćavala.

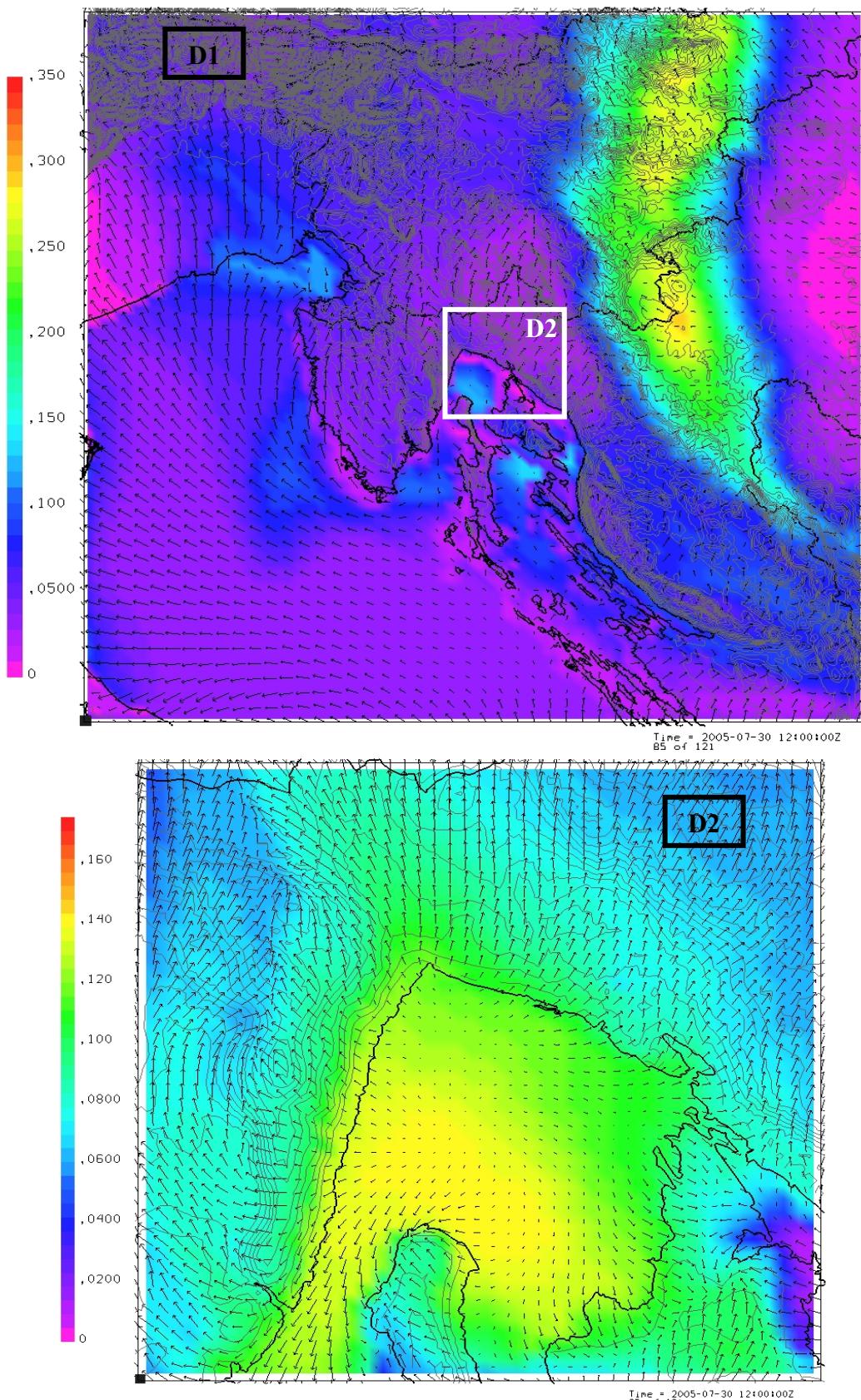
Dnevni režim (Sl. 5.4) započinje prelaskom kopnene na morsku obalnu cirkulaciju prilikom zagrijavanja kopna te dolazi do razvoja anabatičkih vjetrova koji pušu u smjeru nižih temperaturnih područja, odnosno prema planinskim područjima (Gorski kotar, Alpe, Velebit). Specifičnost dnevnih obalnih strujanja je u složenoj orografiji priobalja. Ona utječe na razvoj lokalnih kanaliziranja struje vjetrova u Riječki zaljev kroz Vela i Srednja vrata, ali tek u popodnevним satima s obzirom na prisutnost dviju jakih konvergentnih zona tijekom prijepodneva i to krčke konvergentne zone, konvergentne zone na Učki i nešto slabije creske zone (Prtenjak i sur., 2006.). Takav advektivni proces injektira i inicira formiranje povišenih koncentracija oksidativnih onečišćavala unutar Riječkog zaljeva.

---

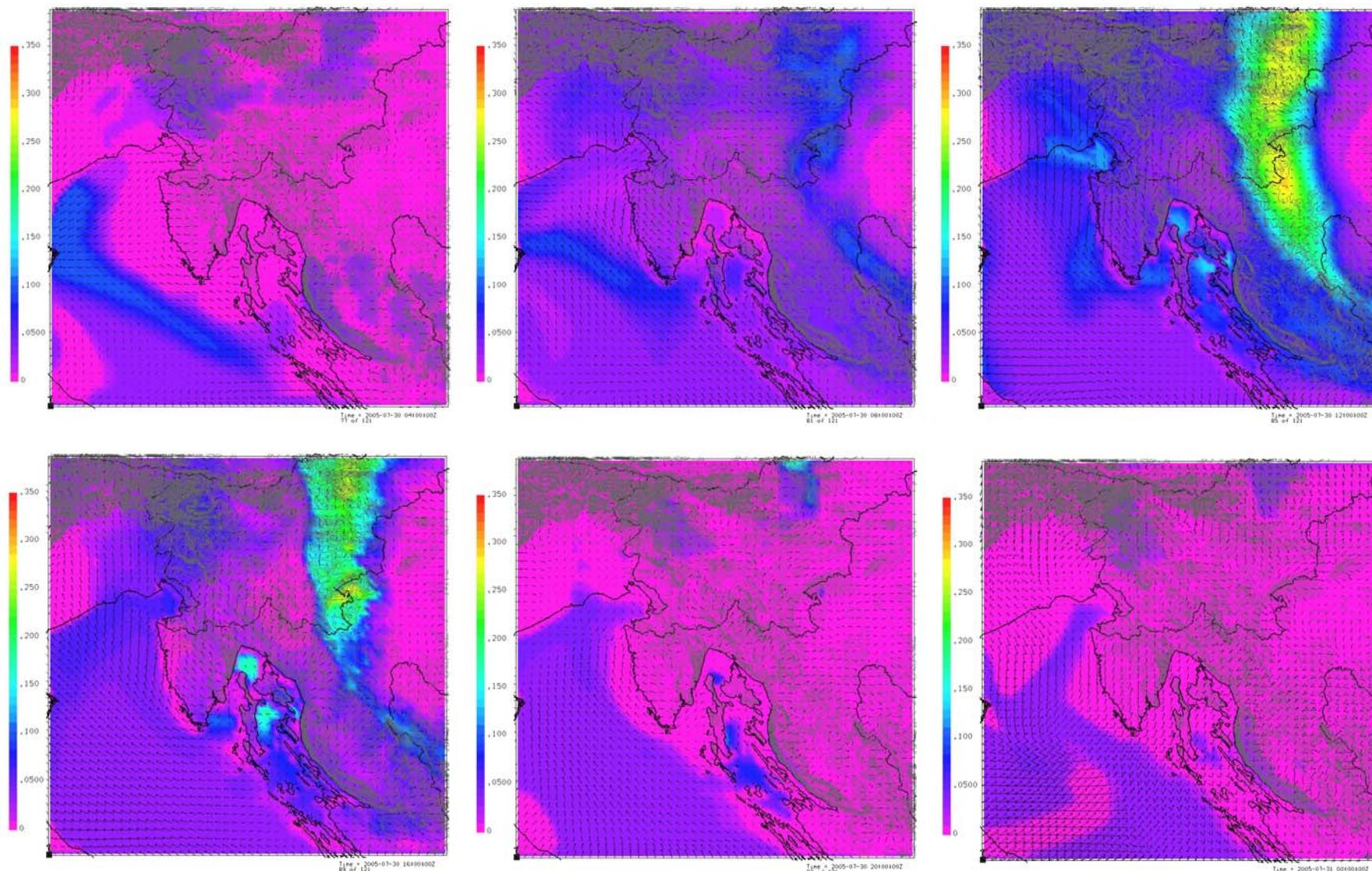
<sup>37</sup> Vidi Poglavlje 2



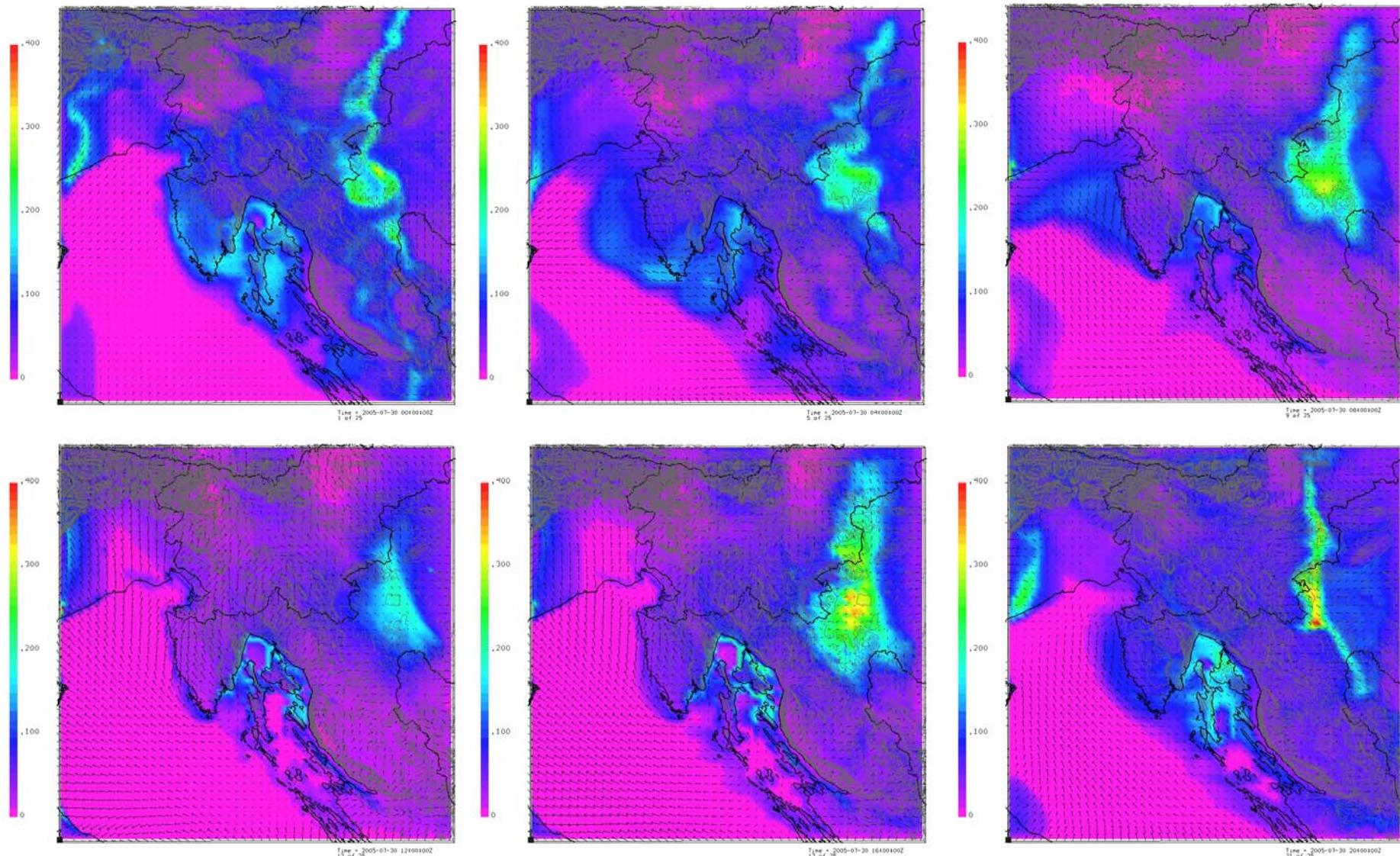
Sl. 5.3 Koncentracije ozona (ppb) i vektori brzine vjetra za domenu D1 (Sjeverni Jadran) i domenu D2 (Riječki zaljev) u 0400UTC 30. srpnja 2005.



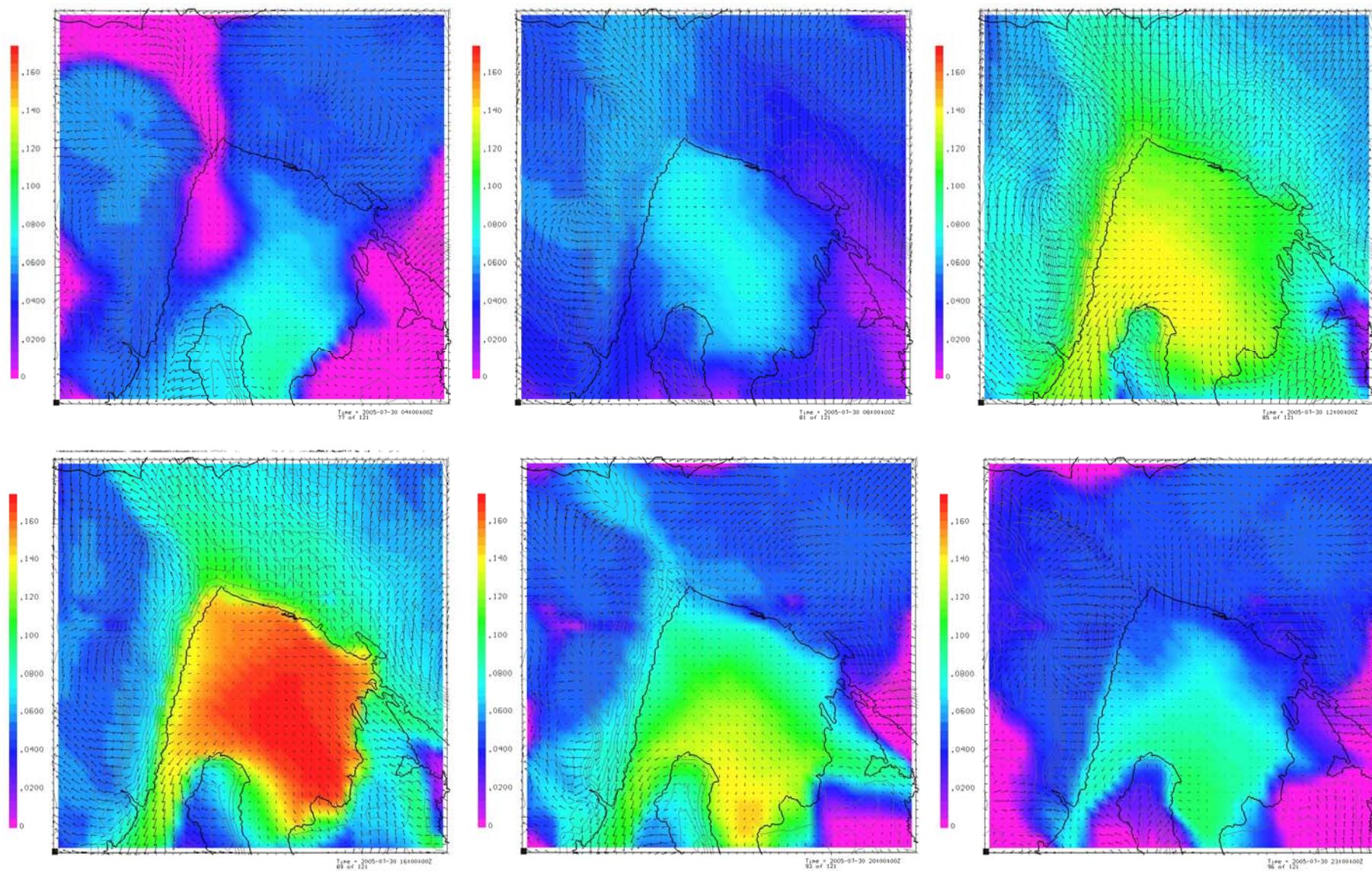
Sl. 5.4 Koncentracije ozona (ppb) i vektori brzine vjetra za domenu D1 (Sjeverni Jadran) i domenu D2 (Riječki zaljev) u 1200UTC 30. srpnja 2005.



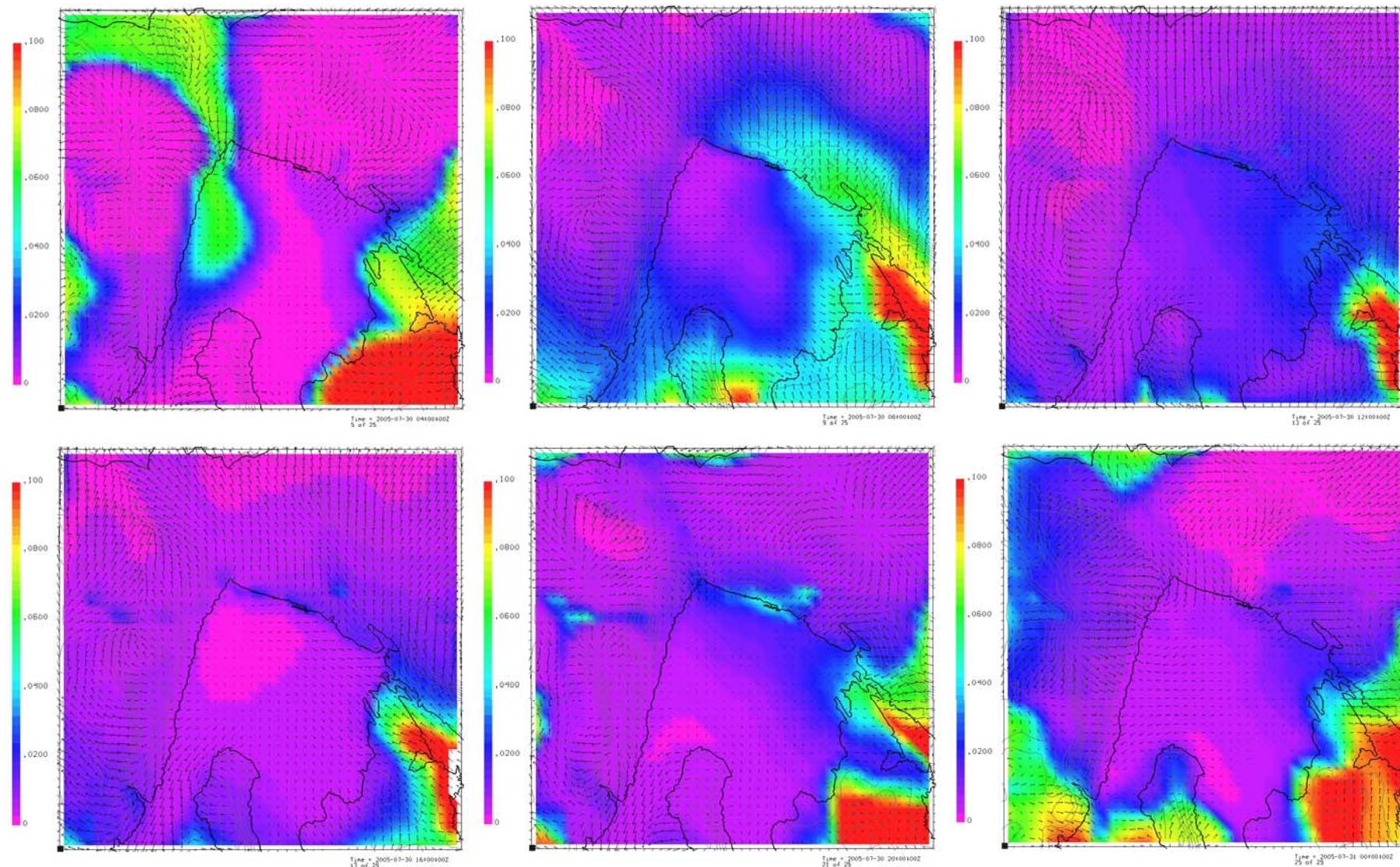
Sl. 5.5 Prizemne koncentracije ozona O<sub>3</sub> (ppmv) i vektorsko polje brzina nad domenom D1 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do dolje desno) 0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC i 2400UTC



Sl. 5.6 Prizemne koncentracije dušičnog dioksida  $\text{NO}_2$  (ppmv) i vektorsko polje brzina nad domenom D1 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do desno) 0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC i 2400UTC



Sl. 5.7 Prizemne koncentracije ozona O<sub>3</sub> (ppmv) i vektorskog polje brzina nad domenom D2 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do dolje desno)  
0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC i 2400UTC



**Sl. 5.8 Prizemne koncentracije dušičnog dioksida NO<sub>2</sub> (ppmv) i vektorsko polje brzina nad domenom D2 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do dolje desno) 0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC i 2400UTC**

## 5.4 Usporedba modeliranih i mjereneh veličina

Rezultati modeliranja kakvoće zraka CMAQ sustavom evaluirani su na način da su uspoređeni s mjerenim podacima iz onih mjernih postaja lokalne mreže Zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije čiji su mjerni instrumenti pokazali zadovoljavajuću točnosti i ispravnost tijekom analize mjereneh podataka opisane u poglavlju 2. To su isključivo mjerne postaje 1 (Opatija - Gorovo), 3 (Rijeka - Krešimirova 52a), 7 (Kostrena – Paveki), 8 (Kostrana – Urinj) i 9 (Bakar - Krasica) (Sl. 5.9). Korištene su prosječne dnevne koncentracije pojedinih onečišćavala za koje postoje mjereni podaci.



**Sl. 5.9 Mjerne stanice lokalne mreže Zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije te njihova indeksacija prema kojoj su ekstrapolirani podaci dobiveni modelom kakvoće zraka CMAQ.**

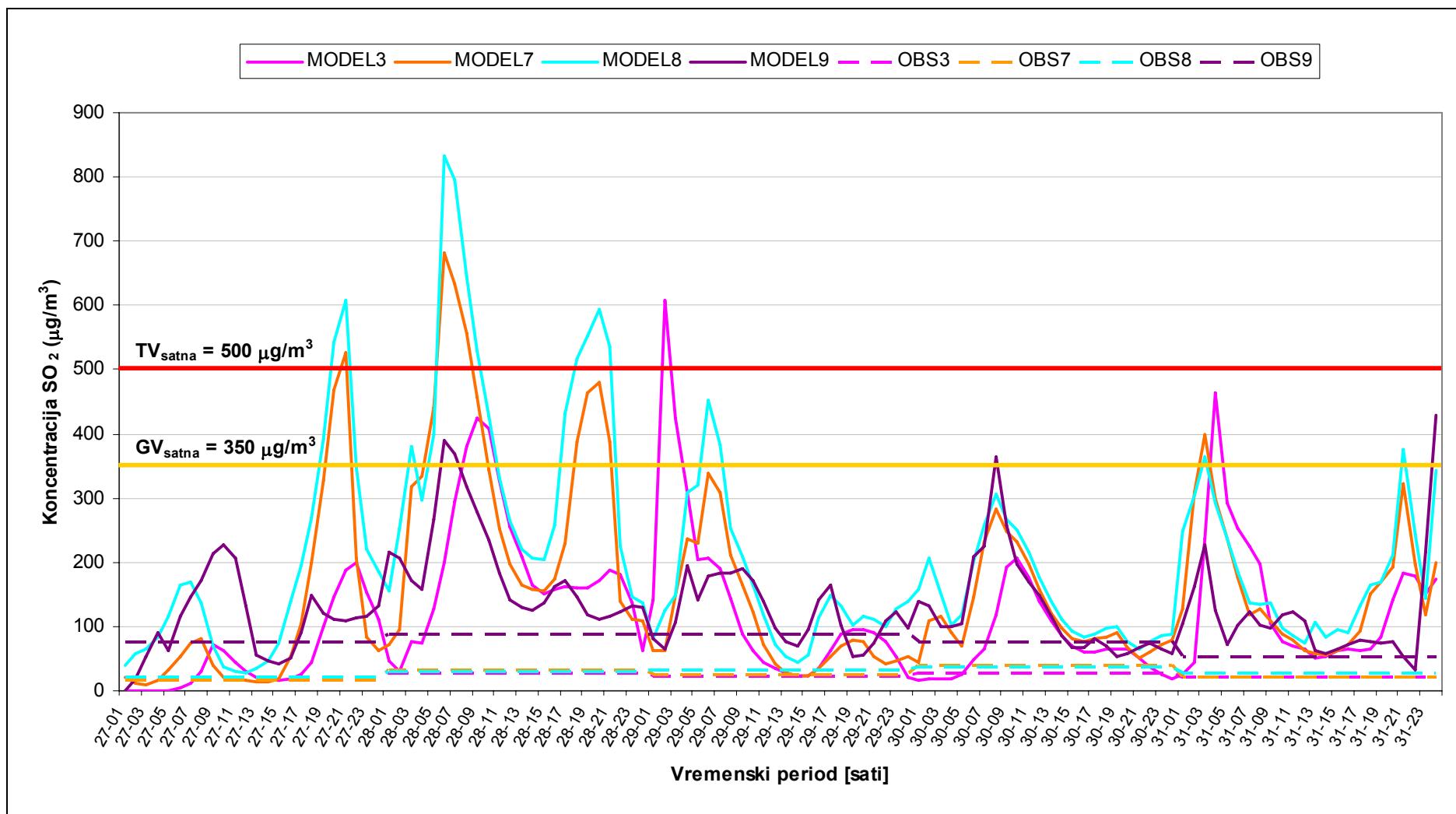
Iako je usporedba prosječnih dnevnih mjerena sa satnim modeliranim veličinama nedovoljno kvalitetna kako bi razlučila dnevni-noćni režim usporedbe, ipak je moguće prikazati stanoviti trend tijekom epizode.

Sl. 5.10 prikazuje satne koncentracije SO<sub>2</sub> (pune linije) i srednja dnevna mjerena koncentracije SO<sub>2</sub> (isprekidane linije). Vidljivu precijenjenost razine SO<sub>2</sub> dobivene CMAQ modelom moguće je objasniti nepoznavanjem pravog režima rada industrijskih izvora SO<sub>2</sub> (vremenski profili) s obzirom da primarni SO<sub>2</sub> predstavlja veći dio koncentracije ukupnog SO<sub>2</sub> u atmosferi te činjenicom da su CCTM-ovi moduli za suhu depoziciju, odnosno taloženje sulfatnih aerosola, nedovoljno ispitani. Prema tome, koncentracije SO<sub>2</sub> potrebno je promatrati s oprezom sukladno sa izrečenim nedostacima tijekom procesa prikupljanja emisija iz industrijskih izvora, te samim nedostacima CMAQ modelirajućeg sustava.

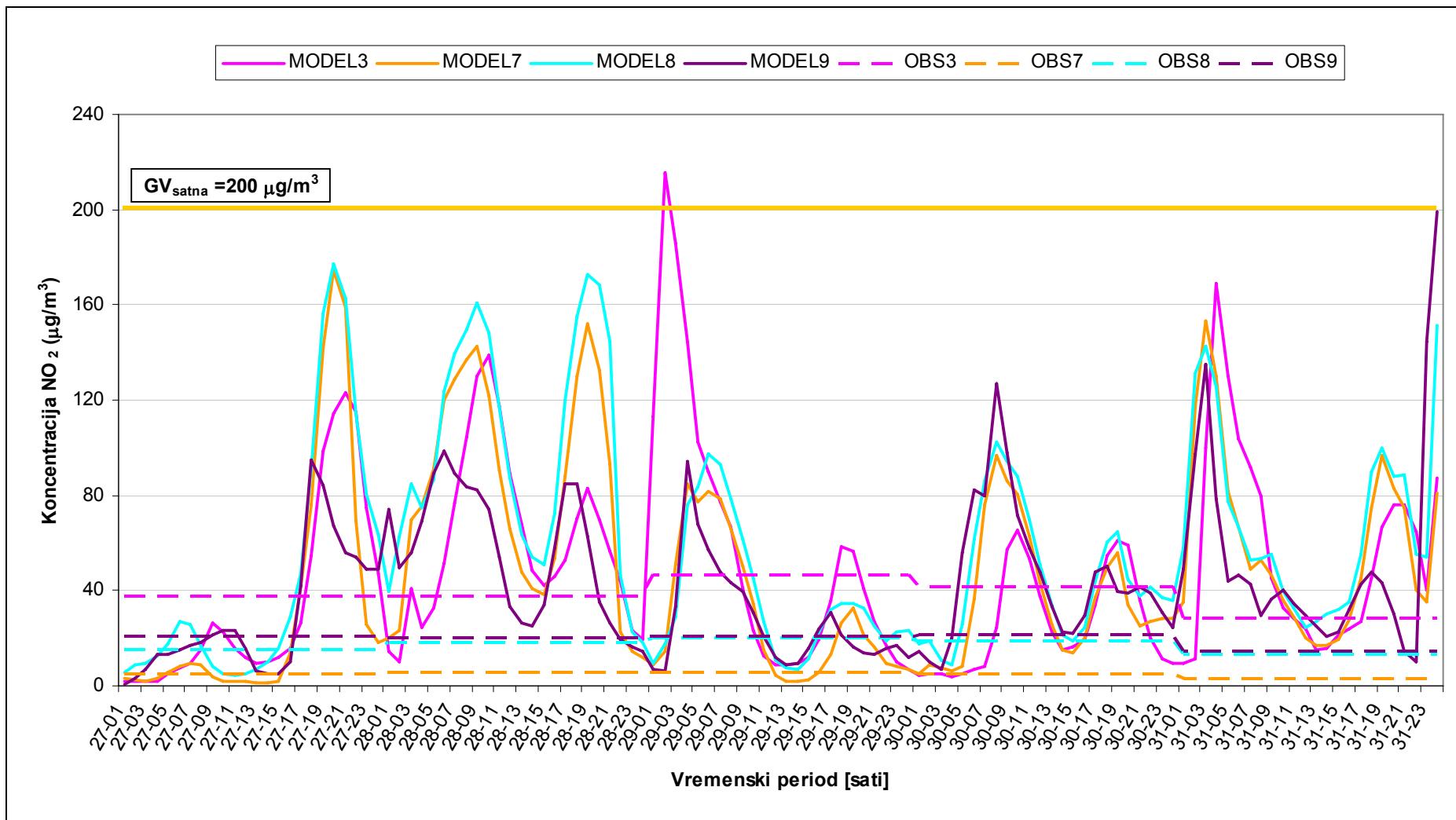
Sl. 5.11 i Sl. 5.12 prikazuju satne i dnevne prosječne koncentracije NO<sub>2</sub> te granične GV i tolerantne TV vrijednosti koncentracija NO<sub>2</sub> sukladno Uredbama Zakona o zaštiti zraka iz 2005. god. prikazanih u Prilogu A. Na sličan način Sl. 5.13 i Sl. 5.14 prikazuju satne i dnevne prosječne koncentracije ozona O<sub>3</sub> te granične GV, tolerantne TV vrijednosti, upozoravajuće i kritične razine koncentracija. Dinamika promjene koncentracije ozona povezana je s

promjenama razine  $\text{NO}_2$  uslijed kemijskih procesa titracije ozona te je stoga objašnjenje naglih i čestih dnevnih izmjena nemoguće opisati nesagledavši njihovu interakciju tijekom cijelodnevnog ciklusa. Prvi dani epizode, točnije 27. i 28. srpnja, predstavljaju period tijekom kojeg nije sa sigurnošću moguće ustanoviti porijeklo povišenja koncentracija pojedinih onečišćavala ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$  i  $\text{NO}_2$ ) nad domenom D2 zbog slabe horizontalne advekcije, a time i nemogućnost da se polja povišenih koncentracija prenesu na područje domene D2. Međutim, utvrđeno je da postoje tri distinktne zone povišenih polja koncentracija među kojima je za riječko područje izrazito značajna sama riječka industrijska zona. Sjevernotalijansku zonu odlikuje spori prekomorski transport koji uglavnom prenosa i taloži onečišćavala duž vanjskih otoka zadarskog arhipelaga te ponekad i istarske obale (Sl. 5.5). Nasuprot talijanskoj, sisacka zona povišenih koncentracija onečišćavala zraka ima snažan utjecaj na ličko područje i područje Gorskog kotara te Žumberačkog gorja na sjeverozapadu Hrvatske (Sl. 5.5 i Sl. 5.6). Riječkom području stoga preostaju alternative: utok onečišćenja terenskom kanalizacijom kojih je u promatranom Riječkom zaljevu četiri i onečišćavala nastala izravno ili neizravno emisijom onečišćenja iz riječke industrije. Analizirajući modelirane satne koncentracije za 29., 30. i 31. srpnja 2005. god. moguće je utvrditi obrazac dnevnog ciklusa izmjene polja koncentracija. Tijekom dana uslijed pojačane sunčeve insolacije dolazi do porasta odvijanja fotooksidativnih reakcija pri kojima, među ostalim onečišćavalima, nastaje ozon  $\text{O}_3$  na temelju akumulirane noćne koncentracije dušikovog dioksida  $\text{NO}_2$  i slobodnih radikala, produkata fotooksidativnih raspada hlapivih organskih spojeva. Producija ozona traje tijekom čitavog dana s maksimumom između 14 i 16 sati poslijepodne. Od 28. do 31. srpnja 2005. god. modeliranjem je utvrđeno prekoračenje upozoravajuće razine od  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  u periodu od 9 do 19 sati, te u vršnim satima prekoračenje kritične razine od  $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a izrazito tijekom 30. srpnja kada je kritična razina obuhvatila čitavi Riječki zaljev. Mjerene vrijednosti koncentracija ozona, iako izražene u prosječnim dnevnim vrijednostima, ukazuju na trend i u prosjeku potvrđuju opisane i prikazane ekstremne vrijednosti koncentracija. Povištene koncentracije  $\text{NO}_2$  u kasnim poslijepodnevnim i večernjim satima (lokalni maksimum u 19 sati) evidentne na Sl. 5.11 uzrokuje cestovni transport i postepeno smanjivanje broja fotooskidativnih reakcija čime je spriječena fotodisocijacija  $\text{NO}_2$  u NO. Koncentracija ozona tijekom noći svodi se na pozadinske atmosferske vrijednosti koncentracija dok produkcija  $\text{NO}_2$  iz ozona dosiže svoj maksimum pred zoru kada započinje novi ciklus produkcije ozona. Na izrazito povištene koncentracije dušikovog dioksida u Riječkom zaljevu tijekom noći utječe i snažna katabatička orografska kanalizacija iz smjera Slovenije uz dolinu sjevernog obronka Čićarije koja svake noći unosi velike količine dušikovog dioksida i ostalih onečišćavala u Riječki zaljev na području Voloskog i Preluke.

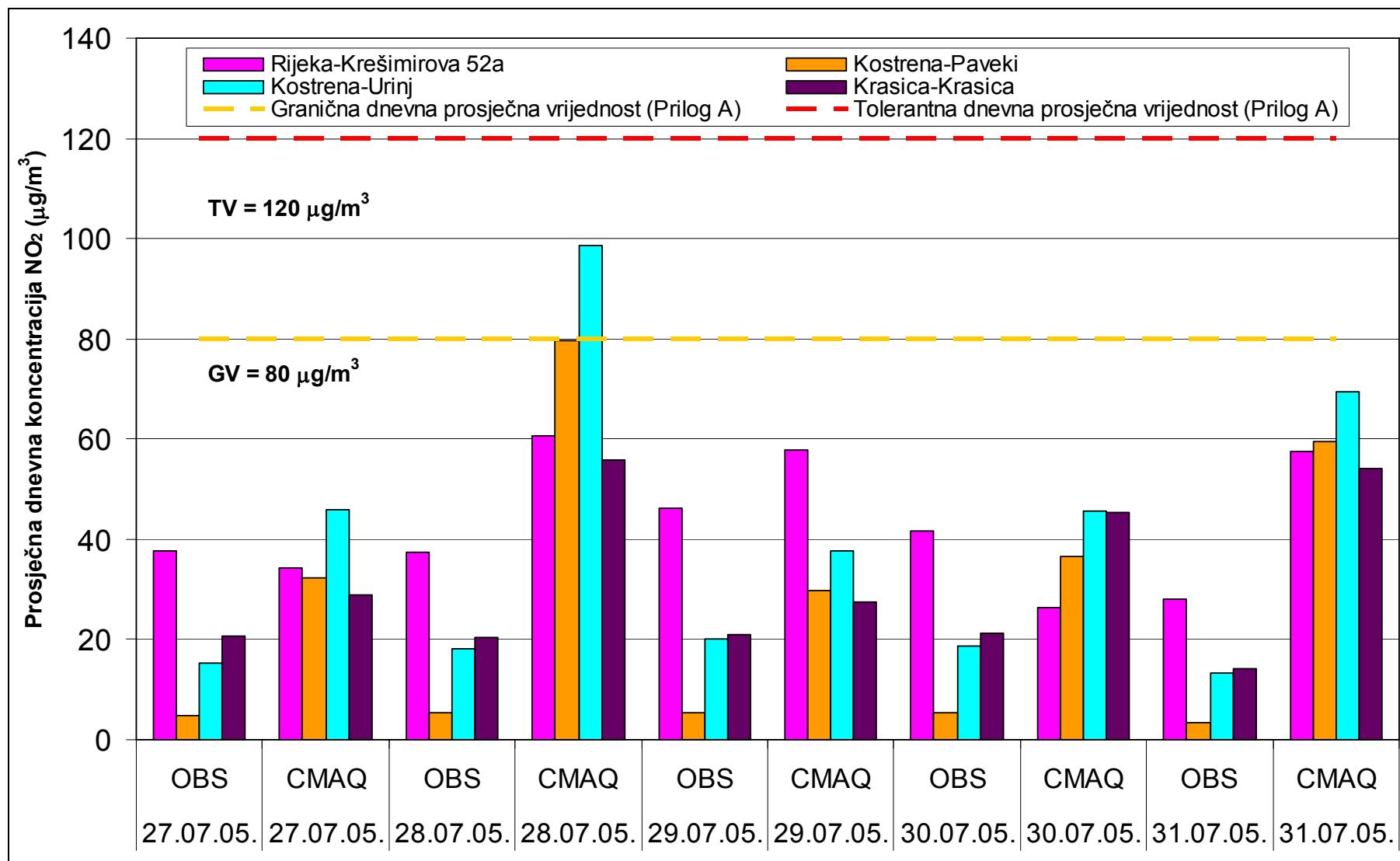
Važno je naglasiti kako su koncentracije ozona i dušičnog dioksida tijekom cijele epizode precijenjene, iako ukazuju na stanoviti trend i djelomično opravdavaju odabrani kemijski mehanizam. Najvažniji zadatak modeliranja kakvoće zraka je prikupljanje što realnijih vrijednosti emisija iz antropogenih i biogenih izvora kako bi modelirane veličine bile što bliže stvarnim mjerenim vrijednostima.



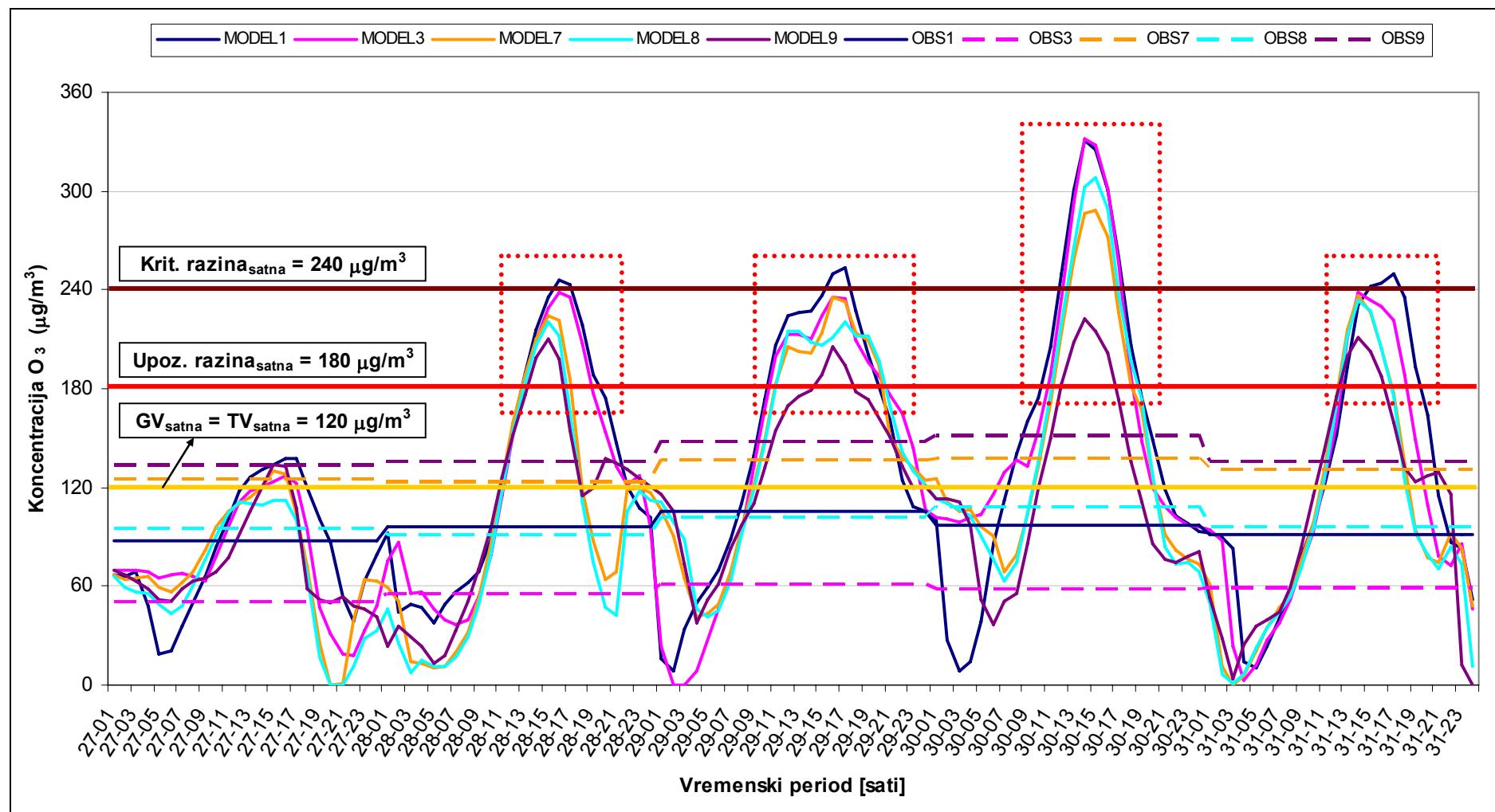
Sl. 5.10 Modelirane satne i mjerene prosječne dnevne koncentracije  $\text{SO}_2$  (izražene u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava od 27.-31. srpnja 2005. god. Prikazani su podaci za četiri mjerne stanice lokalne mreže ZZJJZ PGŽ-a: 3 - Rijeka-Krešimirova ul. 52a, 7 - Kostrena-Paveki, 8 - Kostrena-Urinj i 9 - Bakar-Krasica. GV i TV predstavljaju satne granične i tolerantne vrijednosti, respektivno, sukladno ZZZ-a (Prilog A).



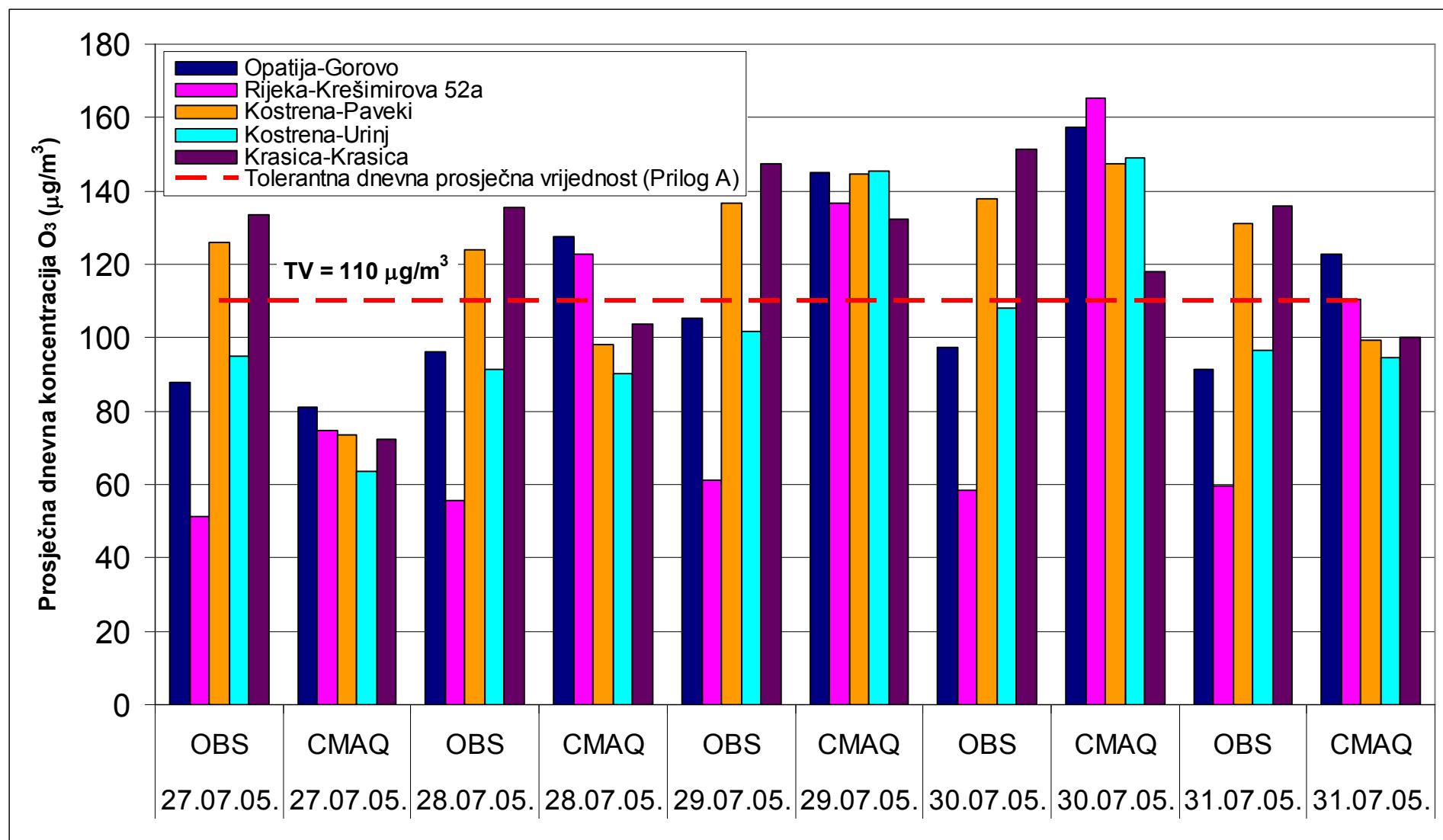
Sl. 5.11 Modelirane satne i mjerene prosječne dnevne koncentracije  $\text{NO}_2$  (izražene u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava od 27.-31. srpnja 2005. god. Prikazani su podaci za četiri mjerne stanice lokalne mreže ZZJJZ PGŽ-a: 3 - Rijeka-Krešimirova ul. 52a, 7 - Kostrena-Paveki, 8 - Kostrena-Urinj i 9 - Bakar-Krasica. GV predstavlja satnu graničnu vrijednost sukladno ZZZ-a (Prilog A).



Sl. 5.12 Modelirane i mjerene prosječne dnevne koncentracije  $\text{NO}_2$  (izražene u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava od 27.-31. srpnja 2005. god. Prikazani su podaci za četiri mjerne stanice lokalne mreže ZZJZ PGŽ-a: 3 - Rijeka-Krešimirova ul. 52a, 7 - Kostrena-Paveki, 8 - Kostrena-Urinj i 9 - Bakar-Krasica. GV i TV predstavljaju satne granične i tolerantne vrijednosti, respektivno, sukladno ZZZ-a (Prilog A).



Sl. 5.13 Modelirane satne i mjerene prosječne dnevne koncentracije  $\text{O}_3$  (izražene u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava od 27.-31. srpnja 2005. god. Prikazani su podaci za pet mjernih stanica lokalne mreže ZZJJZ PGŽ-a: 1 - Opatija-Gorovo, 3 - Rijeka-Krešimirova ul. 52a, 7 - Kostrena-Paveki, 8 - Kostrena-Urinj i 9 - Bakar-Krasica. Prikazana je upozoravajuća i kritična razina ozona u zraku te GV i TV vrijednosti koje predstavljaju satne granične i tolerantne vrijednosti, respektivno, sukladno ZZZ-a (Prilog A).



Sl. 5.14 Modelirane i mjerene prosječne dnevne koncentracije  $\text{O}_3$  (izražene u  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava od 27.-31. srpnja 2005. god. Prikazani su podaci za pet mjernih stanica lokalne mreže ZZJZ PGŽ-a: 1 – Opatija-Gorovo, 3 - Rijeka-Krešimirova ul. 52a, 7 - Kostrena-Paveki, 8 - Kostrena-Urinj i 9 - Bakar-Krasica. GV i TV predstavljaju satne granične i tolerantne vrijednosti, respektivno, sukladno ZZZ-a (Prilog A).

## 6 ZAKLJUČAK

Visoke koncentracije zračnih onečišćavala snažno utječu na ekosustav i ljudsko zdravlje. S obzirom na sve veći gospodarski i populacijski rast u svijetu evidentan je godišnji porast onečišćenja zraka te je stoga opravdano istraživanje u području modeliranja kakvoće zraka. Pored toga, zakoni propisuju i reguliraju korištenje referentnih trodimenzionalnih matematičkih modela u svrhu procjenjivanja razina onečišćenosti te kao preliminarnog dijela studija o utjecajima na okoliš planiranih novih prometnica ili industrijskih kompleksa. Cilj ovog znanstvenog rada je izraditi operativni postupak procjenjivanja razine onečišćenja korištenjem aktualnih znanstvenih spoznaja, dostupnih podataka o emisijama onečišćivača zraka i podataka o mjerjenjima kakvoće zraka u prizemnom sloju. Kako bi se to postiglo, udružen je MM5 meteorološki model, SMOKE emisijski predprocesor s kemijsko transportnim modelom CCTM u CMAQ sustav za modeliranje kakvoće zraka. CMAQ sustav predstavlja snažan alat pri analizi različitih fizikalnih procesa u okolišu vezanih uz kakvoću zraka, a u područjima velike topografske složenosti. Primjenjeni i izrađeni sustav MM5-SMOKE-CMAQ adekvatan je za simulacije različitih epizoda s različitim numeričkim rezolucijama i kompleksnim rasporedom svih kategorija izvora emisija.

Modeliranje kakvoće zraka uspješno je provedeno za izrazito fotooksidativni vremenski period od 27. do 30. srpnja 2006. godine koji je obuhvaćao modeliranje regionalnog područja Sjevernog Jadrana i modeliranje onečišćenja nad lokalnim područjem riječkog zaljeva, tj. ugniježđene domene finije rezolucije. Odabrana epizoda obuhvaćala je stanje tipičnog ljetnog gradijenta niskog tlaka s visokim koncentracijama fotooksidativnih onečišćivača formiranih putem atmosferskih procesa uz prisustvo antropogenih i biogenih izvora emisija primarnih sudionika atmosfere. Takvo atmosfersko stanje zabilježeno je mjerjenjima. Dani promatrane epizode okarakterizirani su oslabljenom sinoptičkom situacijom, bez dominantnih sinoptičkih fenomena, zbog čega dolaze do izražaja fenomeni na mezoskalnoj i lokalnoj prostornoj razini.

U svrhu postizanja ciljeva predloženih u poglavljiju 1.4 izrađene su automatizirane skripte i računalni kodovi kako bi omogućili fleksibilnu i parametarski vođenu primjenu sustava MM5-SMOKE-CMAQ na općeniti slučaj te primjenu sofisticiranih aplikacija za vizualizaciju i analizu rezultata.

Cijeli sustav MM5-SMOKE-CMAQ razdijeljen je na poglavљa u kojima je posebno obrađen svaki dio sustava, a zaključci svakog od njih sažeto su prikazani slijedom.

- S obzirom da je pri opisivanju mezoskalnih i lokalnih meteoroloških fenomena, odgovornih za cjelokupan dnevno-noćni transportni režim onečišćavala u zraku, potrebna simulacija vrlo visoke horizontalne i vertikalne rezolucije, provedeno je niz simulacija kojima se utvrdila optimalna rezolucija uzimajući u obzir vrijeme proračunavanja i usporedivost rezultata sa satelitskim podacima. Odabran je meteorološki predprocesor MM5 u svrhu meteorološkog modeliranja, s obzirom da je nehidrostatskog karaktera i omogućuje provođenje simulacija vrlo visokih rezolucija. Odabrana je horizontalna rezolucija koraka mreže 1km s osamnaest, terenu prilagođenih, vertikalnih slojeva do konačne visine izobarne plohe od 100 kPa na temelju detaljne analize optimalnih parametara numeričke mreže i njihova utjecaja pri opisu dnevnih i noćnih nisko-tropsferskih procesa. Veličine obiju domena definirane su tako da obuhvaćaju sve evidentirane i opisane fenomene (u uvodnom poglavljju) na razini lokalne i regionalne prostorne razine. Veličina domene određena je kako bi

obuhvatila područja najvećih i, za riječko područje, najutjecajnijih prizemnih izvora onečišćenja.

- Prikupljanju i procesiranju emisija onečišćivača pristupilo se zasebno za svaku domenu. Velika regionalna domena pokriva područje više država te je bilo nužno koristiti europski nacionalni inventar emisija kako bi se procesirale emisije nad cijelim Sjevernim Jadranom. Pri tom je bilo potrebno izraditi aplikacije koje omogućuju prilagodbu dobivenih podataka u format i oblik kakav zahtijeva emisijski preprocesor SMOKE. Posebna je pozornost posvećena prikupljanju podataka za lokalnu domenu čija je horizontalna rezolucija 1 km. Prikupljene podatke sačinjavali su podaci o emisijama onečišćavala iz industrijskih dimnjaka, čije emisije predstavljaju najveću opasnost vegetaciji i ljudima toga kraja, a koji su evidentirani od strane relevantnih organizacija kao najodgovorniji izvori pojave graničnih koncentracija štetnih plinova. Također, korištene su informacije o aktivnosti cestovnog prometa na temelju mjerjenih podataka o brojanju prometa na području Primorsko-goranske i Istarske županije. Emisije iz cestovnih vozila određene su koristeći MOBILE5 model u sklopu kojega se nalazi baza podataka ovisnosti pojedinih štetnih plinova o vrsti vozila, kategoriji ceste, meteorološkim uvjetima te ostalim utjecajnim parametrima koji utječu na udio štetnih plinova u ukupnoj emisiji vozila.
- Korišteni kemijski transportni model CCTM te Carbon-Bond IV kemijski mehanizam CMAQ sustava za modeliranje kakvoće zraka omogućili su određivanje polja koncentracija onečišćavala nad željenim domenama i odabranim vremenskim periodom. Granica vanjske domene postavljena je dovoljno daleko od granica ugniježđene domene kako bi umanjila eventualni štetni utjecaj transporta prosječnih pozadinskih onečišćavala s granica velike domene. Dobivena trodimenzionalna polja koncentracija onečišćavala analizirana su te je utvrđena dobra podudarnost s očekivanim fenomenima lokalne skale. Dnevna pojačana fotooksidativnost utjecala je na formiranje povećanih koncentracija pojedinih onečišćavala te uveliko nadjačala onečišćenje primarnih emisija u okoliš. Noćni režim karakterizira pojačana horizontalna advekcija uslijed noćne obalne cirkulacije i planinskih kanalizacija zraka te ujedno i kvalitetnu disperziju onečišćenja izvan Riječkog zaljeva. Usporedba s mjerjenim podacima ukazala je na modelsko precjenjivanje stvarnih vrijednosti, iako su mjereni podaci, korišteni u usporedbi, bili premalene vremenske rezolucije kako bi se pravilno uspoređivali sa satnim modeliranim vrijednostima koncentracija.

Proces modeliranja kakvoće zraka obuhvaćao je istraživanja u više znanstvenih područja tijekom kojih je prilagođen i izrađen niz računarskih aplikacija omogućujući kontinuirano procjenjivanje razine onečišćenosti nad odabranim područjem. S obzirom na činjenicu da je znanstveno područje atmosferskog modeliranja vrlo mlado područje, a njegov razvoj pod direktnim utjecajem suvremenih tehnologija, otvoreno je široko područje mogućnosti daljnog istraživanja. Zahvaljujući upravo primjeni izrađenog operativnog sustava za procjenu onečišćenja na realnom primjeru s kompleksnom geometrijom i atmosferskom dinamikom Riječkog zaljeva, uočeno je mnoštvo mogućnosti za usavršavanje cijelog postupka, kako u aplikativnom, tako i u smislu primjene novih znanstvenih spoznaja u procesu numeričkog modeliranja.

## LITERATURA

- AZO, *Pregled podataka o emisijama u zrak prijavljenim u katastar emisija u okoliš iz pojedinačnih izvora u 2003. godini*, Zagreb, 2005. g.
- AZO, *Pregled podataka o emisijama u zrak prijavljenim u katastar emisija u okoliš iz pojedinačnih izvora u 2004. godini*, Zagreb, 2005. g.
- Binkowski, F. i Shankar, U., *The regional particulate model, Part I: Model description and preliminary results*, J. Geophys. Res., 100: 26191-26209. , 1995. g.
- Byun, D.W., J. Young., G. Gipson., J. Godowitch., F. Binkowsk, S. Roselle, B. Benjey, J. Pleim, J. Ching., J. Novak, C. Coats, T. Odman, A. Hanna, K. Alapaty, R. Mathur, J. McHenry, U. Shankar, S. Fine, A. Xiu, and C. Jang, *Description of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model*, Proceedings of the American Meteorological Society 78th Annual Meeting, Phoenix, AZ, Jan. 11-16, 1998. 264-268., 1998. g.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S., *Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality System (CMAQ) modeling system*, Atmospheric Modeling Division, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, EPA 600/R-99/030, 1999. g.
- Carmichael G.R., Peters, L.K. i Saylor, R.D., *The STEM-II regional scale acid deposition and photochemical oxidant model-I. An overview of model development and applications*, Atmos. Environ. 25A: 2077-2090., 1991. g.
- Chang, J.S., Brost, R.A., Isaksen, I.S.A., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W.R. i Walcek, C.J., *A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and Formulation*, J. Geophy. Res. 92: 14681-14700., 1987. g.
- Colella, P., i Woodward, P. R., *The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations*, J. Comp. Phys 54, 174-201., 1984. g.
- Čanić, K.Š., Kraljević, L., *The Impact Of Model Resolution On Simulated Distribution Of Bura*, Meteorological and Hydrological Service, Zagreb, 2005. g.
- Dennis, R.L., Byun, D.W., Novak, J.H., Galluppi, K.J., Coats, C.J. i Vouk, M.A., *The next generation of integrated air quality modeling: EPA's Models-3*. Atmospheric Environment, 30, No. 12, 1925-1938., 1996. g.
- Dudhia, J., *Numerical study of convection observed during winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model*, Journal of Atmospheric Science, 46, 3077-3107, 1989. g.
- Dudhia, J., *A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front*. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513., 1993. g.

- Dudhia, J., A, *multi-layer soil temperature model for MM5. Preprints*, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, 22-24 July 1996, Boulder, Colorado, 49-50., 1996. g.
- Dudhia, J., Gill, D., Guo, Y.-R., Hansen, D., Manning, K. i Wang, W., *PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class notes (MM5 modeling system version 2)*, 1998. g.
- Dudhia, J., Gill, D., Guo, Y.-R., Hansen, D., Manning, K. i Wang, W., *PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class notes and User's Guide (MM5 modeling system version 3)*, 2002. g.
- Gery, M.W., Whitten, G.Z., Killus, J.P., Dodge, M.C., *A photochemical kinetics mechanism for urbsan and regional scale computer modeling*, Journal of Geophysical Research, **94**(D10), 12925-12956, 1989. g.
- Gillani, N.V. i Godowitch, J.M., Plume-in-grid treatment of major point source emissions, Byun, D.W., Ching, J.K.S., Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality System (CMAQ) modeling system, Atmospheric Modeling Division, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, EPA 600/R-99/030, 1999. g.
- Guidelines for Developing and Air Quality (Ozone and PM<sub>2.5</sub>) Forcasting Program*, US EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Information Transfer and Program Integration Division, AirNow Program, EPA-456/R-03-002, Research Triangle Park, NC, 2003. g.
- Grell, G.A., Dudhia, J. i Stauffer, D.R., *A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale modeling system (MM5)*, NCAR Tech. Note, NCAR/TN-397+IA, 119 str, 1994.g.
- Hedges, S. i Wayland, R., *Ozone Monitoring, Mapping and Public Outreach. Delivering Real-Time Ozone Information to Your Community*, EPA/625/R-99/007, 1999. g.
- Hong, S.-Y., Pan, H.L., *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*, Monthly Weather Review, **124**, 2322-2339, 1996. g.
- Jacobson, M.Z. i Turco, R.P., *SMVGEAR: A sparse-matrix vectorized Gear code for atmospheric models*, Atmos. Environ. 20, 3369-3385., 1994. g.
- Jacobson, M.Z., *Fundamentals of atmospheric modelling*, Cambridge University Press, UK, 656 pp., 1999. g.
- Jorba, O., Gasso, S., Baldasano, J.M., *Regionacirculation within the Iberian Peninsula east coast*. 26. NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Application. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 388-395, 2003. g.
- Jurić, Ž., Vešligaj, D., Burek, J., Hublin, A., Fijan-Parlov, S., Delija-Ružić, V., *National Inventory Report, Inventory of Anthropogenic Emissions by sources and removals by sinks of all greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the period 1990-2002.*, EKONERG, Zagreb, 2004. g.

- Jurić, Ž., Vešligaj, D., Burek, J., Hublin, A., Fijan-Parlov, S., Delija-Ružić, V., *National Inventory Report, Inventory of Anthropogenic Emissions by sources and removals by sinks of all greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for the period 1990-2003.*, EKONERG, Zagreb, 2005. g.
- Jurić, Ž., Vešligaj, D., Burek, J., Hublin, A., Fijan-Parlov, S., Delija-Ružić, V., *Emisija onečišćujućih tvari u zrak na području Republike Hrvatske za 2004. godinu*, AZO-EKONERG, Doc. 25-06-334/14, Zagreb, 2006. g.
- Morris, R.E. i Meyers, T.C., *User's Guide for the Urban Airshed Model, Volume 1:User's Manual for UAM(CB-IV)*. EPA-450/4-90-007A. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC., 1990. g.
- Otte, T.L., *Developing meteorological fields*, Byun, D.W., Ching, J.K.S., *Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality System (CMAQ) modeling system*, Atmospheric Modeling Division, U.S. EPA, Research Triangle Park, NC, EPA 600/R-99/030, 1999. g.
- Pineda, N., Jorba, O., Jorge, J., Baldasano, J.M., *Using NDVI SPOT-VGT Dana to update Land-use Map: Application to a Mesoscale Meteorological Model*, International Journal in Remote Sensing, **25**(1), 129-143, 2004. g.
- Prtenjak, M.T., Grisogono, B., Nitis, T., *Shallow mesoscale flows at the north-eastern Adriatic coast*, 2006., (u pripremi)
- Prtenjak, M.T., *Numeričko simuliranje obalne cirkulacije zraka na sjevernom Jadranu*, Disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2006. g.
- Stull, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic, 666 pp., 1988. g.
- Thunis, P., *The influence of scale on modelled ground level O<sub>3</sub> concentrations*, Research Report no. 57, Norwegian Meteorological Institute, 2001.
- Vadić, V., Izvještaj o stanju zraka u Republici Hrvatskoj s ciljem uspostave informacijskog sustava zaštite okoliša Republike Hrvatske, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, 2005. g.
- Venkatram, A.K. i Karamchandani, P.K., *The ADOM II Scavenging Module*, ENSR Consulting and Engineering Report 0780-004-205. Camarillo, CA., 1998. g.
- Venkatram, A., *The parameterization of the vertical dispersion of a scalar in the atmospheric boundary layer*, Atmos. Environ. 27A, 1963-1966., 1993. g.
- Young, J.O., Sills, E., Jorge, D., Optimization of the Regional Oxidant Model for the Cray YMP, EPA/600/R-94/065., 1993. g.
- Zdunkowsky, W. i Bott, A., *Dynamics of the Atmosphere: A Course in Theoretical Meteorology*, Cambridge University Press, 720 str., 2003. g.



## POPIS SLIKA

Slika 1.1 Fotokemijski smog nad Londonom (15. lipnja 2005.g.) .....	1
Slika 1.2. Prosječne godišnje koncentracije onečišćenja zraka po kontinentima izražene .....	2
Slika 1.3 Procesi koji utječu na razinu troposferskog onečišćenja .....	6
Slika 1.4 Shematski prikaz reakcija uključenih u pretvorbu <i>NO</i> u <i>NO<sub>2</sub></i> i nastanak <i>O<sub>3</sub></i> .....	7
Slika 1.5 Idealizirana distribucija atmosferskih finih i grubih čestica.....	8
Slika 1.6 Izvori plinova prekursora i primarnih čestica te mehanizmi nastanka i odstranjivanja <i>PM</i> čestica iz atmosfere. Najvažnije meteorološke značajke prikazane su za pojedini proces. ....	9
Slika 1.7 Meteorološke prostorne skale.....	10
Slika 1.8 Vertikalni profili brzina vjetra s obzirom na tipove hrapavosti površine.....	11
Slika 1.9 Karakteristične raspodjele temperature atmosfere u funkciji visine.....	12
Slika 1.10 Konturni prikaz površinskog tlaka (lijevo) i visinska karta 500 hPa izobarne plohe .....	13
Slika 1.11 Anticiklonalna temperaturna inverzija i visina miješanja.....	13
Slika 1.13 50x50km EMEP mreža .....	16
Slika 1.15 Lokalna mreža postaja za trajno praćenje onečišćenja zraka na riječkom području.....	22
Slika 1.16 Struktura modeliranja kvalitete zraka.....	24
Slika 2.1 Geografski smještaj i orografske kanalizacije Riječkog zaljeva .....	29
Slika 2.2 Godišnje emisije sumpornog dioksida SO <sub>2</sub> tijekom 2003. godinu nad područjem sjevernog Jadrana, kontinentalne Hrvatske i Slovenije, a za sektor S1 <i>Izgaranje u termoenergetskim postrojenjima i postrojenjima za pretvorbu energije</i> prema SNAP97 nomenklaturi klasifikacije izvora onečišćenja sukladno EMEP protokolu (Izvor: CORINAIR/EMEP baza emisija).....	31
Slika 2.3 Pregled mjerjenih parametara po postajama.....	32
Slika 2.4 Dnevne prosječne koncentracije NO <sub>2</sub> tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine.....	33
Slika 2.5 Dnevne prosječne koncentracije TSP i PM <sub>10</sub> tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine.....	33
Slika 2.6 Dnevne prosječne koncentracije O <sub>3</sub> tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine.....	34
Slika 2.7 Dnevne prosječne koncentracije SO <sub>2</sub> tijekom ljetnih mjeseci 2005. godine .....	34
Slika 2.8 Konturni prikaz ekstremnih temperatura tijekom podneva 31. srpnja 2005. ....	35
Slika 3.1 Dijagram toka sustava MM5 .....	38
Slika 3.2 MM5 podržane kartografske projekcije .....	39
Slika 3.3 Isječak računske mezoskalne domene ( <i>plavi čvorovi</i> ) i mreže meridijana i paralela u okolišu ishodišta domene. Istaknutih 16 presjeka meridijana i paralela ( <i>crveni čvorovi</i> ) predstavljaju mrežu za dvodimenzionalnu paraboličku interpolaciju statičkih podataka na čvorove mezoskalne računske domene.....	39
Slika 3.4 Prikaz Arakawa-B numeričke mreže na rjedojo i finijoj.....	40
Slika 3.5 Vertikalna MM5 koordinata: Teren prateća sigma ( $\sigma$ ) koordinata. ....	41
Slika 3.6 Prikaz rubnih granica dviju MM5 računskih domena D1 i D2, sa rezolucijom 3km i 1 km. ....	46
Slika 3.7 Prikaz inicijalizacija <i>gfs.t00z.pgrbf00</i> ( <i>crveno</i> ) i proizvedenih prognoza <i>gfs.t00z.pgrbfXX</i> ( $XX=03,06,09,\dots,357,360$ ) GFS globalnih sinoptičkih modela. GFS prognoze koriste se za početne i granične uvjete MM5 simulacija.....	48

<b>Slika 3.10 Geografski prikaz testnih lokacija domene D1 .....</b>	<b>50</b>
<b>Slika 3.11 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja <math>HS_0</math> i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene, <math>HS_3</math> i <math>HS_9</math>, respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC,+18UTC i +24UTC lokaciji L1 domene D1.....</b>	<b>51</b>
<b>Slika 3.12 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja <math>HS_0</math> i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene, <math>HS_3</math> i <math>HS_9</math>, respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC,+18UTC i +24UTC lokaciji L2 domene D1.....</b>	<b>51</b>
<b>Slika 3.13 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja <math>HS_0</math> i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene, <math>HS_3</math> i <math>HS_9</math>, respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC,+18UTC i +24UTC lokaciji L3 domene D1.....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 3.14 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja <math>HS_0</math> i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene, <math>HS_3</math> i <math>HS_9</math>, respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC,+18UTC i +24UTC lokaciji L4 domene D1.....</b>	<b>52</b>
<b>Slika 3.15 Usporedba vertikalnih temperaturnih profila satelitskih inicijalnih polja <math>HS_0</math> i simulacija za 3km-sku i 9km-sku horizontalnu rezoluciju domene, <math>HS_3</math> i <math>HS_9</math>, respektivno. Usporedba profila dana je za tri GFS inicijalizacije +12UTC,+18UTC i +24UTC lokaciji L5 domene D1.....</b>	<b>53</b>
<b>Slika 3.18 Prikaz vertikalnog rasporeda sigma slojeva .....</b>	<b>55</b>
<b>Slika 3.20 Vertikalni profili temperatura simulacija S6, S10, S18, S26 i S34 .....</b>	<b>57</b>
<b>Slika 3.21 Prikaz granica inicijalnih i horizontalno proširenih domena D1 i D2 .....</b>	<b>58</b>
<b>Slika 3.23 Prostorno i vremenski osrednjeni vertikalni profili temperatura (<i>lijево</i>) .....</b>	<b>59</b>
<b>Slika 4.1 Dijagram toka SMOKE sustava aplikacija i odgovarajućih ulaznih i izlaznih datoteka u vektorskom i matričnom zapisu .....</b>	<b>62</b>
<b>Slika 4.4 Automatska brojila prometa .....</b>	<b>69</b>
<b>Slika 4.5 Prikaz lokacija i tipova brojila prometa na cestama šireg riječkog područja .....</b>	<b>70</b>
<b>Slika 4.7 Mjesečni vremenski profili <math>f_{mj}</math> primjenjeni na točkaste (domena D2) i stacionarne izvore (domena D1) za svaki SCC kod pojedinog korištenog izvora onečišćenja (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava) .....</b>	<b>78</b>
<b>Slika 4.8 Dnevni vremenski faktori <math>f_{dan}</math> primjenjeni na točkaste (domena D2) i stacionarne izvore (domena D1) za svaki SCC kod pojedinog korištenog izvora onečišćenja (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava) .....</b>	<b>78</b>
<b>Slika 4.9 Satni vremenski faktori <math>f_{sat}</math> primjenjeni na točkaste (domena D2) i stacionarne izvore (domena D1) za svaki SCC kod pojedinog korištenog izvora onečišćenja (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava) .....</b>	<b>79</b>
<b>Slika 4.10 Mjesečni vremenski profili cestovne aktivnosti prikazani za pojedinu kategoriju cesta i vozila (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava) .....</b>	<b>79</b>
<b>Slika 4.11 Tjedni vremenski profili aktivnosti pojedinih kategorija cesta (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava) .....</b>	<b>80</b>
<b>Slika 4.12 Satni vremenski profili aktivnosti pojedinih kategorija cesta (preuzeto iz inventarskih datoteka ATREF/APPRO SMOKE v2.2 sustava) .....</b>	<b>80</b>

<b>Slika 4.14 Emisije dušičnog monoksida NO (lijevo) i sumpornog dioksida SO<sub>2</sub> (desno) iz pokretnih izvora nad domenom D2 izražene u mol/s u 1200UTC 30.07.2005. god.....</b>	<b>82</b>
<b>Slika 5.1 Struktura CMAQ sustava.....</b>	<b>86</b>
<b>Slika 5.2 Prikaz vertikalnih profila stabilnih pozadinskih koncentracija pojedinih kemijskih spojeva čiste atmosfere umjerenog geografskog pojasa .....</b>	<b>88</b>
<b>Slika 5.3 Koncentracije ozona (ppb) i vektori brzine vjetra za domenu D1 (Sjeverni Jadran) .....</b>	<b>96</b>
<b>Slika 5.4 Koncentracije ozona (ppb) i vektori brzine vjetra za domenu D1 (Sjeverni Jadran) .....</b>	<b>97</b>
<b>Slika 5.5 Prizemne koncentracije ozona O<sub>3</sub> (ppmv) i vektorsko polje brzina nad domenom D1 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do dolje desno) 0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC i 2400UTC .....</b>	<b>98</b>
<b>Slika 5.6 Prizemne koncentracije dušičnog dioksida NO<sub>2</sub> (ppmv) i vektorsko polje brzina nad domenom D1 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do dolje desno) 0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC, 2400UTC .....</b>	<b>99</b>
<b>Slika 5.7 Prizemne koncentracije ozona O<sub>3</sub> (ppmv) i vektorskog polje brzina nad domenom D2 dana 30. srpnja 2005. godine u (od gore lijevo do dolje desno) 0400UTC, 0800UTC, 1200UTC, 1600UTC, 2000UTC i 2400UTC .....</b>	<b>100</b>
<b>Slika 5.8 Prizemne koncentracije dušičnog dioksida NO<sub>2</sub> (ppmv) i vektorsko polje brzina nad domenom D2 dana 30. srpnja 2005. godine u .....</b>	<b>101</b>
<b>Slika 5.9 Mjerne stанице lokalne mreže Zavoda za javno zdravstvo Primorsko-goranske županije te njihova indeksacija prema kojoj su ekstrapolirani podaci dobiveni modelom kakvoće zraka CMAQ.....</b>	<b>102</b>
<b>Slika 5.10 Modelirane satne i mjerene prosječne dnevne koncentracije SO<sub>2</sub> (izražene u µg/m<sup>3</sup>) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava.....</b>	<b>104</b>
<b>Slika 5.11 Modelirane satne i mjerene prosječne dnevne koncentracije NO<sub>2</sub> (izražene u µg/m<sup>3</sup>) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava.....</b>	<b>105</b>
<b>Slika 5.12 Modelirane i mjerene prosječne dnevne koncentracije NO<sub>2</sub> (izražene u µg/m<sup>3</sup>) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava.....</b>	<b>106</b>
<b>Slika 5.13 Modelirane satne i mjerene prosječne dnevne koncentracije O<sub>3</sub> (izražene u µg/m<sup>3</sup>) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava.....</b>	<b>107</b>
<b>Slika 5.14 Modelirane i mjerene prosječne dnevne koncentracije O<sub>3</sub> (izražene u µg/m<sup>3</sup>) tijekom odabrane epizode za evaluaciju CMAQ sustava.....</b>	<b>108</b>
<b>Slika B.1 Geografski koordinatni sustav sa generaliziranim koordinatama q<sub>i</sub> (<i>i</i>=λ, φ, r). ....</b>	<b>130</b>



## POPIS TABLICA

<b>Tabela 1.1. Protokoli CLRTAP konvencije o dalekosežnom prekograničnom onečišćenju zraka .....</b>	<b>15</b>
<b>Tabela 1.2 Meteorološke prostorne skale i pripadni meteorološki modeli.....</b>	<b>25</b>
<b>Tabela 2.1 Emisija značajnijih pojedinačnih izvora onečišćenja i udjel u ukupnoj emisiji Hrvatske (2002.)</b>	<b>30</b>
<b>Tablica 3.1 Karakteristike računskih domena .....</b>	<b>46</b>
<b>Tablica 3.2 Raspodjela vertikalnih <math>\sigma</math>-koordinata za računske domene D1 i D2.....</b>	<b>47</b>
<b>Tablica 3.3 Opis testnih lokacija domene D1.....</b>	<b>50</b>
<b>Tablica 3.4 Opis testnih lokacija domene D1.....</b>	<b>58</b>
<b>Tablica 4.1 Prikaz uskladivanja SNAP i SCC nomenklature emisijskih izvora onečišćenja .....</b>	<b>65</b>
<b>Tablica 4.2 Specifikacija točkastih izvora i njihove godišnje emisije .....</b>	<b>68</b>
<b>Tablica 4.3 Ograničenja brzina na prometnicama sukladno SMOKE klasifikaciji.....</b>	<b>69</b>
<b>Tablica 4.4 SCC nomenklatura pokretnih izvora vezanih sa pojedinom kategorijom ceste.....</b>	<b>69</b>
<b>Tablica 4.5 Uskladivanje klasifikacija vozila prema SMOKE/MOBILE6 modelu i prema brojilima prometa Hrvatskih Cesta .....</b>	<b>70</b>
<b>Tablica 4.6 Prosječni godišnji i ljetni dnevni promet na brojačkim mjestima raspoređenih na općine, vrste cesta i vozila projiciran za 2005. god. na temelju brojenja prometa tijekom 2001-2004 (preuzeto iz Hrvatskih cesta, 2005.).....</b>	<b>71</b>
<b>Tablica 4.7 SCC profilni kodovi za razvrstavanje emisija (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) .....</b>	<b>73</b>
<b>Tablica 4.8 Molni udjeli <math>f_{k,i,j}</math> i molekularne težine <math>M_j</math> razvrstanih kemijskih spojeva iz emisija CO,NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, PM10 i SO<sub>2</sub> prema profilima iz Tablica 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) za svaku kategoriju stacionarnih točkastih (donea D2) i površinskih (domena D1) izvora.....</b>	<b>74</b>
<b>Tablica 4.9 Molni udjeli <math>f_{k,i,j}</math> halapljivih organskih spojeva prema profilnim kodovima iz Tablica 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) za svaku kategoriju stacionarnih površinskih izvora .....</b>	<b>74</b>
<b>Tablica 4.10 Molekularne težine <math>M_j</math> halapljivih organskih spojeva prema profilnim kodovima iz Tablica 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2003. – SMOKE v2.2) za svaku kategoriju stacionarnih površinskih izvora .....</b>	<b>75</b>
<b>Tablica 4.11 Maseni udjeli primarnih finih čestica u emisiji PM<sub>2.5</sub> prema profilnim kodovima iz Tablica 4.7 (preuzeto od M. Houyoux, 2002. – SMOKE v1.4) za svaku kategoriju stacionarnih točkastih (domena D2) i površinskih (domena D1) izvora .....</b>	<b>75</b>
<b>Tablica 4.12 Procesi nastanka emisija iz motornih vozila, emisije i podložne kategorije vozila sukladno MOBILE6 programu (preuzeto iz <i>User guide to MOBILE6.2</i>, 2003.) .....</b>	<b>76</b>
<b>Tabela A.1 Granične i tolerantne vrijednosti koncentracija.....</b>	<b>125</b>
<b>Tabela A.2 Granične vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari .....</b>	<b>125</b>
<b>Tabela A.3 Granice procjenjivanja koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zdravlje ljudi .....</b>	<b>126</b>
<b>Tabela A.4 Granice procjenjivanja koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zaštitu ekosustava i vegetacije.....</b>	<b>126</b>

<b>Tabela A.5 Tolerantne vrijednosti (ciljne vrijednosti) za ozon .....</b>	<b>126</b>
<b>Tabela A.6 Granične vrijednosti (dugoročni ciljevi) za ozon .....</b>	<b>126</b>
<b>Tabela A.7 Kritične razine za sumporov dioksid izražen kao <math>SO_2</math> i dušikove okside izražene kao <math>NO_2</math> .....</b>	<b>126</b>
<b>Tabela A.8 Kritične i upozoravajuće razine za ozon u zraku .....</b>	<b>126</b>

## POPIS OZNAKA

OZNAKA	SI JEDINICA	OPIS
$A$	$m^2$	površina
$C^{k,l}$	-	ćelija $k,l$
$D_\theta$	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	toplinska difuzivnost
$D_u, D_v$	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	horizontalni difuzivni članovi
$D_w$	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	vertikano miješanje planetarnog graničnog sloja / vertikalni difuzivni član
<b>E</b>		jedinični tenzor
$E_{i,j,k}$	$g/s\ ili\ mol/s$	maseni / molni protok emisije k-tog onečišćavala u okoliš na lokaciji i,j
$EI(k)$	$t/god$	ukupna godišnja količina emitiranog onečišćavala u okoliš
$e^{k,l}$	$g/s\ ili\ mol/s$	maseni / molni protok emisije ćelije $k,l$
<b>e</b>		jedinični vektor
$\phi$	$molekula\ foton^{-1}$	kvantna korisnost reakcije
$\phi$	$m^2\ s^{-2}$	geopotencijal
$\phi_a, \Phi_a$	$m^2\ s^{-2}$	gravitacijski potencijal
$\phi_z$	$m^2\ s^{-2}$	centrifugalni potencijal
$f$	$rad^l\ (s^{-1})$	Coriolisov parametar
$f_s(k)$	-	faktor za kemijsko razvrstavanje
$f_{G_{i,j}}(k)$	-	faktor prostorne raspodjele
$f_c(k)$	-	kontrolni faktor
$f_{GW}(k)$	-	faktor rasta
$f_T(k, h)$	-	faktor vremenske raspodjele
$F$	$foton/cm^{-2}\ min^{-1}\ nm^{-1}$	protok sunčevog zračenja

$\hat{F}_q$	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	horizontalna komponenta Reynoldsovog turbulentnog protoka
$F_{q_i}^3$	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$	vertikalna komponenta Reynoldsovog turbulentnog protoka
$\mathbf{F}_i$	$N$	masene (volumne) sile
$\mathbf{f}_i$	$N/kg$	masene (volumne) sile po jedinici mase
$G$	$m^3\ s^{-2}\ kg^{-1}$	gravitacijska konstanta
$g$	$m/s^2$	gravitacijsko ubrzanje
$g_{i,j}$		osnovna metrička veličina
$\Gamma_{ijk}$		Christoffelov simbol
$h_{dep}$	$m$	visina prvog sloja vertikalne generalizirane koordinate $\hat{x}^3$
$\mathbf{J}$		viskozni tenzor naprezanja
$J$	$\text{min}^{-1}$	mjera fotodisocijativnosti
$J_\xi$	-	vertikalna Jakobijana za modificirani koordinatni sustav $(x,y,\xi)$
$\varphi$	$^\circ$	geografska širina
$\varphi_i$	$kg/m^3$	koncentracija kemijskog spoja $i$
$k$	-	učestalost reakcije
$\hat{K}^{11}, \hat{K}^{22}, \hat{K}^{33}$	$m^2\ s^{-1}$	dijagonalne komponente tenzora turbulentne difuzivnosti $\hat{K}$
$\hat{K}^{13}, \hat{K}^{23}, \hat{K}^{31}, \hat{K}^{32}$	$m^2\ s^{-1}$	nedijagonalne komponente tenzora turbulentne difuzivnosti $\hat{K}$
$l$	$rad^I\ (s^{-1})$	Coriolisov parametar
$\lambda$	$nm$	valna duljina
$\lambda$	$^\circ$	geografska dužina
$M_j$	$g/mol$	molekularna težina $j$ -te molekule
$\mathbf{M}$	$kg\ m/s$	količina gibanja
$m$	-	projektivni kartografski faktor
$m$	$kg$	masa

$M_z$	$kg$	masa Zemlje
$\mathbf{n}$		vektor normale
$\Omega$	$rad^{-1} (s^{-1})$	kutna brzina
$\mathbf{\Omega}$		vektor rotacione brzine Zemlje
$\omega_{nk}$	$rad^{-1} (s^{-1})$	komponenta brzine rotacije Zemlje u generaliziranim koordinatama
$p$	$Pa$	tlak
$p'$	$Pa$	perturbirani tlak
$\mathbf{P}_i$	$N$	površinske (kontaktne) sile
$\mathbf{p}_i$	$N/m^2$	površinske sile po jedinici površine
$PDP$	<i>broj vozila / dan</i>	prosječni dnevni promet
$Q$	$m^2 kg s^{-2}$	toplina uzrokovana dijabatskim procesima
$\mathbf{Q}$		bazni vektor generaliziranog koordinatnog sustava
$\bar{q}_i$	$kg/kg$	srednji maseni udio i-tog onečićavala
$q_i$		$i$ -ta koordinata baznog vektora
$q_v$	-	maseni udio vodene pare
$q_c$	-	maseni udio leda (vode u oblacima)
$q_r$	-	maseni udio kišne vode (snijega)
$\theta$	$^{\circ}C$	potencijalna temperatura
$\mathbf{r}$		položajni vektor
$r$	$m$	vertikalna koordinata geografskog koordinatnog sustava
$r_o$	$m$	radijus zemlje, položajni vektor točke na zemljinoj površini
$R_{aero_i}, R_{\varphi_i}$	$s^{-1}$	vremenska promjena masenog udjela sudionika $i$ uslijed kemijskih reakcija
$\bar{\rho}$	$kg/m^3$	srednja gustoća zraka
$S$	$m^2$	površina
$\sigma$	$cm^2 molekula^{-1}$	apsorpcijski poprečni presjek

$\sigma$	-	bezdimenzijska vertikalna tlačna koordinata
t	s	vrijeme
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
u	$\text{m/s}$	komponenta brzine u smjeru x osi
V	$\text{m}^3$	volumen
V	$\text{m/s}$	komponenta brzine u smjeru y osi
$v_n, v^n$	$\text{m/s}$	komponenta relativne brzine gibanja u generaliziranom koordinatnom sustavu
$\mathbf{v}_A$		vektor apsolutne brzine gibanja
$\mathbf{v}_\Omega$		vektor brzine rotacionog gibanja Zemlje
$\mathbf{v}_D$		vektor brzine deformiranja, promjene položaja
$\mathbf{v}$		vektor relativne brzine gibanja
$\mathbf{v}_P$		vektor brzine gibanja točke u apsolutnom koordinatnom sustavu
$v_d, \hat{v}_g$	$\text{m/s}$	brzina suhe depozicije (sedimentacije)
VMT	$\frac{1.609\text{km}}{\text{god} \cdot \text{tip vozila}}$	godišnje prijeđeni broj kilometara za određeni tip vozila
$\text{VtT}_k$	-	faktor uvećanja emisijske vrijednosti nemetanskih halapljivih organskih spojeva
W	$\text{m/s}$	komponenta brzine u smjeru z osi
$W_n, W^n$	$\text{m/s}$	komponenta brzine gibanja točke u generaliziranom koordinatnom sustavu
x	m	horizontalna komponenta Kartezijevog koordinatnog sustava
$\hat{x}^1, \hat{x}^2, \hat{x}^3$	m	generalizirane koordinate
$\xi$	-	bezdimenzijska vertikalna teren prateća koordinata
y	m	horizontalna komponenta Kartezijevog koordinatnog sustava
z	m	vertikalna koordinata Kartezijevog koordinatnog sustava

## PRILOZI

### **A. Granične i kritične vrijednosti te razine procjenjivanja onečišćujućih tvari u zraku prema Zakonu o zaštiti zraka (NN 178/04)**

Novim Zakonom o zaštiti zraka Republike Hrvatske iz 2004. godine je jasno razlučena razlika utjecaja pojedine razine onečišćenosti s obzirom na zdravlje ljudi i na zaštitu ekosustava i vegetacije te su za svaki propisane različite njemu specifične granične, tolerantne i kritične vrijednosti pojedinih onečišćujućih tvari u zraku te njihove donje i gornje granice procjenjivanja. U sljedećih par tablica prikazati ćemo dio graničnih te ostalih vrijednosti vezanih uz određivanje i ocjenjivanje razine onečišćenja u zraku preuzetih iz Uredbi ZZZ-a.

**Tabela A.1 Granične i tolerantne vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zdravlje ljudi**

ONEČIŠĆUĆA TVAR	VRIJEME USREDNJAVANJA	RAZINA GRANIČNE VRIJEDNOSTI (GV)	UČESTALOST DOZVOLJENIH PREKORAČENJA	RAZINA TOLERANTNE VRIJEDNOSTI (TV)	BROJČANA VRIJEDNOST RAZINE TOLERANTNE VRIJEDNOSTI ZA GODINU IZ RAZDOBLJA 2006.–2010. (ZA II. FAZU PM <sub>10</sub> ZA GODINU NIZ RAZDOBLJA 2011.–2015.)	DATUM DOSEZANJA GRANIČNE VRIJEDNOSTI
SO <sub>2</sub>	1 sat	350 µg m <sup>-3</sup>	GV ne smije biti prekoračena više od 24 puta tijekom kalendarske godine	500 µg m <sup>-3</sup> (TV ne smije biti prekoračena više od 24 puta tijekom kalendarske godine)	500 – 30 (N – 2006)	31. prosinca 2010.
	24 sata	125 µg m <sup>-3</sup>	GV ne smije biti prekoračena više od 3 puta tijekom kalendarske godine)	–	–	–
	1 godina	50 µg m <sup>-3</sup>	–	–	–	–
NO <sub>2</sub>	1 sat	200 µg m <sup>-3</sup>	GV ne smije biti prekoračena više od 18 puta tijekom kalendarske godine	300 µg m <sup>-3</sup> (TV ne smije biti prekoračena više od 18 puta tijekom kalendarske godine)	300 – 12,5 (N – 2006)	31. prosinca 2014.
	24 sata	80 µg m <sup>-3</sup>	GV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom kalendarske godine	120 µg m <sup>-3</sup> (TV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom kalendarske godine)	120 – 5 (N – 2006)	31. prosinca 2014.
	1 godina	40 µg m <sup>-3</sup>	–	60 µg m <sup>-3</sup>	60 – 2,5 (N – 2006)	31. prosinca 2014.
Dim	1 godina	50 µg m <sup>-3</sup>	–	75 µg m <sup>-3</sup>	75 – 5 (N – 2006)	31. prosinca 2010.
PM <sub>10</sub> I. faza	24 sata	50 µg m <sup>-3</sup>	GV ne smije biti prekoračena više od 35 puta tijekom kalendarske godine	75 µg m <sup>-3</sup> (TV ne smije biti prekoračena više od 35 puta tijekom kalendarske godine)	75 – 5 (N – 2006)	31. prosinca 2010.
	1 godina	40 µg m <sup>-3</sup>	–	60 µg m <sup>-3</sup>	60 – 4 (N – 2006)	31. prosinca 2010.
PM <sub>10</sub> II. faza <sup>(2)</sup>	24 sata	50 µg m <sup>-3</sup>	GV ne smije biti prekoračena više od 7 puta tijekom kalendarske godine)	50 µg m <sup>-3</sup> (TV ne smije biti prekoračena više od 35 puta tijekom kalendarske godine)	–	31. prosinca 2015.
	1 godina	20 µg m <sup>-3</sup>	–	30 µg m <sup>-3</sup>	30 – 0,5 (N – 2011)	31. prosinca 2015.
PM <sub>2,5</sub>	1 godina	25 µg m <sup>-3</sup>	–	30 µg m <sup>-3</sup>	30 – 0,5 (N – 2006)	31. prosinca 2015.

**Tabela A.2 Granične vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zaštitu ekosustava i vegetacije**

ONEČIŠĆUĆA TVAR	SVRHA	VRIJEME USREDNJAVANJA	RAZINA GRANIČNE VRIJEDNOSTI	DATUM DOSIZANJA GRANIČNE VRIJEDNOSTI
SO <sub>2</sub>	ekosustav	kalendarska godina i zimsko razdoblje*	20 µg m <sup>-3</sup>	31. prosinca 2010.
NO <sub>x</sub>	vegetacija	1 godina	30 µg m <sup>-3</sup>	31. prosinca 2010.

**Tabela A.3 Granice procjenjivanja koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zdravlje ljudi**

ONEČIŠĆUĆA TVAR	GRANICA PROCJENJIVANJA	RAZDOBLJE PRAĆENJA	VRIJEME USREDNJAVANJA	IZNOS GRANICE PROCJENJIVANJA	UČESTALOST DOZVOLJENIH PREKORAČENJA
SO <sub>2</sub>	gornja	kalendarska godina	24 sata	75 µg m <sup>-3</sup> (60% GV)	ne smiju biti prekoračena više od 3 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini
	donja	kalendarska godina	24 sata	50 µg m <sup>-3</sup> (40% GV)	ne smiju biti prekoračene više od 3 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini
NO <sub>2</sub>	gornja	kalendarska godina	1 sat 1 godina	140 µg m <sup>-3</sup> (70% GV) 32 µg m <sup>-3</sup> (40% GV)	jednosatne GV ne smiju biti prekoračene više od 18 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini
	donja	kalendarska godina	1 sat 1 godina	100 µg m <sup>-3</sup> (50% GV) 26 µg m <sup>-3</sup> (65% GV)	jednosatne GV ne smiju biti prekoračene više od 18 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini
PM <sub>10</sub>	gornja	kalendarska godina	24 sata 1 godina	30 µg m <sup>-3</sup> (60% GV) 14 µg m <sup>-3</sup> (70% GV)	24-satne GV ne smiju biti prekoračene više od 7 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini
	donja	kalendarska godina	24 sata 1 godina	20 µg m <sup>-3</sup> (40% GV) 10 µg m <sup>-3</sup> (50% GV)	24-satne GV ne smiju biti prekoračene više od 7 puta u bilo kojoj kalendarskoj godini

**Tabela A.4 Granice procjenjivanja koncentracija onečišćujućih tvari u zraku s obzirom na zaštitu ekosustava i vegetacije**

ONEČIŠĆUĆA TVAR	GRANICA PROCJENJIVANJA	RAZDOBLJE PRAĆENJA	VRIJEME USREDNJAVANJA	IZNOS GRANICE PROCJENJIVANJA
SO <sub>2</sub> zaštita ekosustava	gornja	zimsko razdoblje	24 sata	12 µg m <sup>-3</sup> (60 % GV)
	donja	kalendarska godina	24 sata	8 µg m <sup>-3</sup> (40 % GV)
NO <sub>x</sub> zaštita vegetacije	gornja	kalendarska godina	1 godina	24 µg m <sup>-3</sup> (80 % GV)
	donja	kalendarska godina	1 godina	19,5 µg m <sup>-3</sup> (65 % GV)

**Tabela A.5 Tolerantne vrijednosti (ciljne vrijednosti) za ozon**

CILJ	VRIJEME USREDNJAVANJA	TOLERANTNA VRIJEDNOST (CILJNA VRIJEDNOST)	DATUM DOSEZANJA TOLERANTNE VRIJEDNOSTI (CILJNE VRIJEDNOSTI)
Zaštita zdravlja ljudi	Najviša dnevna osmosatna srednja vrijednost	120 µg/m <sup>3</sup> ne smije se prekoračiti više od 25 dana po kalendarskoj godini, usrednjeno na tri godine	2010.
Zaštita zdravlja ljudi	Srednja dnevna vrijednost (0-24h)	110 µg/m <sup>3</sup> ne smije se prekoračiti više od 7 puta po kalendarskoj godini	2010.
Zaštita vegetacije	AOT40, izračunat iz jednosatnih vrijednosti od svibnja do srpnja	18.000 µg/m <sup>3</sup> .h usrednjeno na pet godina	2010.

**Tabela A.6 Granične vrijednosti (dugoročni ciljevi) za ozon**

CILJ	VRIJEME USREDNJAVANJA	GRANIČNA VRIJEDNOST	DATUM DOSEZANJA DUGOROČNOG CILJA (a)
Zaštita zdravlja ljudi	Najviša dnevna osmosatna srednja vrijednost unutar kalendarske godine	120 µg/m <sup>3</sup>	–
Zaštita vegetacije	AOT40, izračunat iz jednosatnih vrijednosti od svibnja do srpnja	6.000 µg/m <sup>3</sup> .h	–

**Tabela A.7 Kritične razine za sumporov dioksid izražen kao SO<sub>2</sub> i dušikove okside izražene kao NO<sub>2</sub>**

ONEČIŠĆUĆA TVAR	VRIJEME USREDNJAVANJA	KRITIČNA RAZINA
SO <sub>2</sub>	trosatni pomični prosjek	500 µg m <sup>-3</sup>
NO <sub>2</sub>	trosatni pomični prosjek	400 µg m <sup>-3</sup>

**Tabela A.8 Kritične i upozoravajuće razine za ozon u zraku**

ONEČIŠĆUĆA TVAR	VRIJEME USREDNJAVANJA	KRITIČNA RAZINA
Upozoravajuća razina	jednosatni prosjek	180 µg m <sup>-3</sup>
Kritična razina	jednosatni prosjek	240 µg m <sup>-3</sup>

## B. ZAKONI ATMOSFERSKOG GIBANJA

Atmosfera predstavlja jedan složeni sustav, a dio s kojim smo svjesno ili nesvjesno u stalnom kontaktu i u kojem se odvijaju svi važniji procesi za život proteže se do visine od 10 km. Budući da Zemlja rotira konstantnom kutnom brzinom, svi se procesi u atmosferi mogu promatrati iz dva koordinatna sustava – apsolutnog i relativnog koordinatnog sustava.

Apsolutni koordinatni sustav daje temelje za opis svih kretanja. To je Kartezijev koordinatni sustav koji se povezuje s "fiksnim" točkama i smatra inertnim sustavom s obzirom na promatrača, tj. miruje u odnosu na njega. Nasuprot tome, relativni koordinatni sustav ne miruje, u našem slučaju on rotira istom kutnom brzinom kojom rotira i Zemlja.

Slijedi prikaz zakona koji vrijede pri kretanju čestica atmosfere, korištenjem najprije apsolutnog, a zatim i relativnog koordinatnog sustava.

### B.1 Jednadžba apsolutnog gibanja

Jednadžba apsolutnog gibanja se definira u Kartezijevom (inercijalnom) koordinatnom sustavu. Pozivanjem na to, moguće je primjeniti drugi Newtonov zakon gibanja koji kaže da je promjena količine gibanja  $\mathbf{M}$  s vremenom jednaka sumi svih realnih sila koje djeluju na tijelo. Za volumen  $V(t)$  omeđen površinom  $S(t)$ , slijedi:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \mathbf{v}_A dV = \sum_i \mathbf{F}_i + \sum_i \mathbf{P}_i \quad (\text{B.1})$$

, gdje vrijedi:

$\mathbf{M}$  – količina gibanja

$dV$  – elementarni volumen

$\rho$  – gustoća medija

$\mathbf{v}_A$  – apsolutna brzina

$\mathbf{F}_i$  – masene (volumne) sile

$\mathbf{P}_i$  – površinske (kontaktne) sile

Ova jednadžba govori da je promjena volumena, čiji se površinski elementi gibaju apsolutnom brzinom  $\mathbf{v}_A$ , jednaka sumi svih masenih i površinskih sila koje djeluju na spomenuti volumen.

Uz uvjet da vrijedi

$$\sum_i \mathbf{F}_i = \int_{V(t)} \sum_i \rho \mathbf{f}_i dV \quad (\text{B.2})$$

$$\sum_i \mathbf{P}_i = \oint_{S(t)} \sum_i \mathbf{p}_i dS, \quad (\text{B.3})$$

gdje  $\mathbf{f}_i$  označava masene sile koje djeluju na jedinicu mase, a  $\mathbf{p}_i$  kontaktne sile koje djeluju na jediničnu površinu  $dS$ , možemo pisati

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \mathbf{v}_A dV = \int_{V(t)} \sum_i \rho \mathbf{f}_i dV + \oint_{S(t)} \sum_i \mathbf{p}_i dS. \quad (\text{B.4})$$

Jedina masena sila koja će se u ovom slučaju uzeti u razmatranje je gravitacijska sila privlačnosti Zemlje, a, radi pojednostavljenja, uzima se da je cijela masa Zemlje  $M_Z$  sadržana u njenom centru. Prema Newtonowom zakonu privlačenja gravitacijska sila, koja djeluje na jedinicu mase, iznosi:

$$F = -G \frac{m M_z}{r^2} r_0 \quad \rightarrow \quad \mathbf{f}_a = \frac{F}{m} = -G \frac{M_z}{r^2} \mathbf{r}_0, \quad (\text{B.5})$$

gdje vrijedi

$G$  – gravitacijska konstanta

$m$  – masa tijela u gravitacijskom polju Zemlje

$M_z$  – masa Zemlje

$\mathbf{r} = r \mathbf{r}_0$  – položajni vektor, tj. vektor koji spaja središte Zemlje s promatranim elementarnim volumenom fluida

Iz vektorske analize je poznato da svako vektorsko polje čiji je rotor jednak nuli može biti zamijenjeno gradijentom skalarnog polja. Direktno se pozivajući na to pravilo, uočava se da sila  $\mathbf{f}_a$  može biti izražena u funkciji potencijala na način:

$$\nabla \times \mathbf{f}_a = 0 \quad \rightarrow \quad \mathbf{f}_a = -\nabla \phi_a, \quad (\text{B.6})$$

a kako vrijedi općenito pravilo da je specifična sila jednaka derivaciji potencijala po pomaku, tj.:

$$f_a = -\frac{d\phi_a}{dr} \quad (\text{B.7})$$

dobiva se izraz za gravitacijski potencijal,  $\Phi_a$  u obliku:

$$\phi_a = -G \frac{M_z}{r} + \text{konstanta} \quad (\text{B.8})$$

Plohe konstantnog potencijala se nazivaju *ekvipotencijalne plohe*. U našem slučaju, plohe konstantnog gravitacijskog potencijala odgovaraju sfernim površinama.

Nadalje, potrebno je razmotriti i površinske sile. One nastaju iz tlačnih sila,  $\mathbf{p}_1 = -p \mathbf{n}$  koje djeluju u suprotnom smjeru od smjera normale na površinu  $dS$  i viskoznih sila,  $\mathbf{p}_2 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}$  koje su rezultat kretanja medija. Veličina  $\mathbf{J}$  je poznata pod nazivom viskozni tensor naprezanja. Iz navedenog slijedi:

$$\sum_i \mathbf{p}_i dS = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{n} dS \cdot (-p \mathbf{E} + \mathbf{J}) = dS \cdot (-p \mathbf{E} + \mathbf{J}) \quad (\text{B.9})$$

gdje se jedinični tensor  $\mathbf{E}$  uvodi iz potrebe zadovoljenja svojstva vektora.

Uvrštavanjem (B.6) i (B.9) u (B.4), slijedi:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} (\rho \mathbf{v}_A + \rho \nabla \phi_a) dV = \oint_{S(t)} \sum_i (-p \mathbf{E} + \mathbf{J}) dS \quad (\text{B.10})$$

a primjenom Gaussovog teorema o divergenciji i naknadnim pojednostavljenjem dobije se važna jednadžba dinamike atmosfere – *jednadžba absolutnog gibanja* koja je poznatija pod nazivom **Navier – Stokesova jednadžba**:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}_A}{dt} = -\rho \nabla \phi_a - \nabla p - \nabla \cdot \mathbf{J}, \quad (\text{B.11})$$

te kaže da je sila kojom okoliš djeluje na izoliranu parcelu zraka jednaka zbroju gravitacijske sile, gradijenta tlačnih sila i sila trenja.

Za slučaj kada se zanemare viskozne sile (neviskozan fluid) jednadžba prelazi u poznatu **Eulerovu jednadžbu** dinamike fluida:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}_A}{dt} = -\rho \nabla \phi_a - \nabla p, \quad (\text{B.12})$$

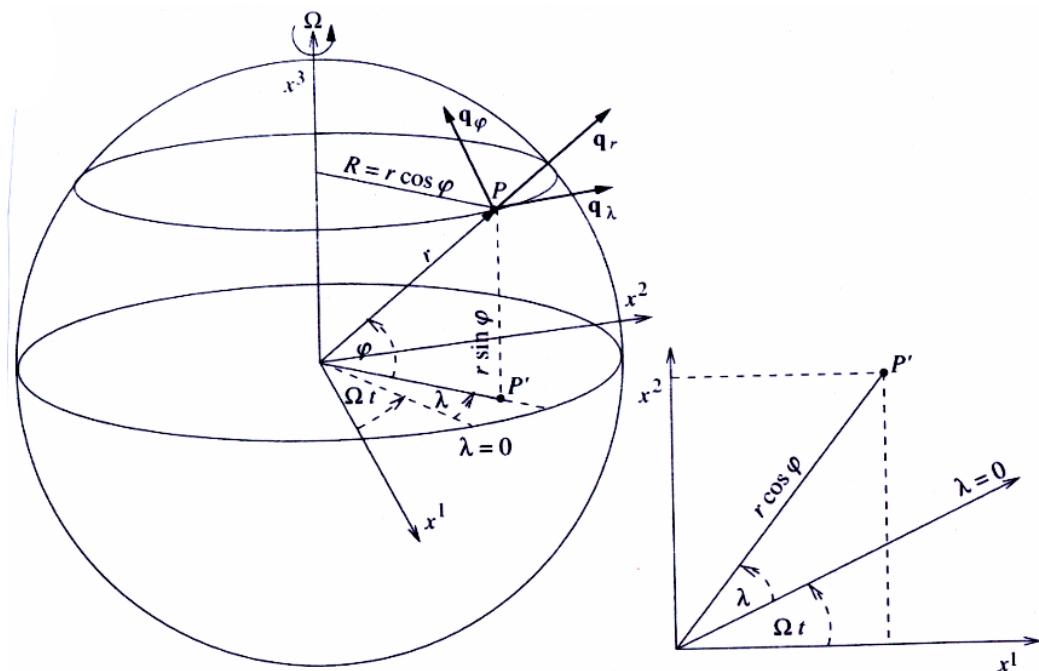
a ukupna se sila umanjuje za iznos sila trenja koje su u ovom slučaju zanemarene.

## B.2 Jednadžba relativnog gibanja

Numeričko modeliranje određenih meteoroloških problema zahtijeva odabir odgovarajućeg koordinatnog sustava. Korištenje jedinstvenog koordinatnog sustava za cijelu paletu problema atmosferskog gibanja zraka zahtijeva uvođenje dodatnih matematičkih članova jednadžbi koji otežavaju rješenje postavljenog problema te ih je stoga potrebno izbjegavati. Na primjer, istraživanje strujanja zraka uz kompleksnu topografiju terena zahtijeva korištenje terenu prilagođenog koordinatnog sustava. Pravokutni Kartezijev koordinatni sustav nije pogodan kod rješavanja problema sa sfernim simetričnostima (simulacije vrtložnih strujanja, globalne cirkulacije, itd.), stoga jednadžbe atmosferskog stanja u ovom dijelu izvodimo za generalizirani koordinatni sustav.

### B.2.1 RELATIVNA I APSOLUTNA BRZINA GIBANJA

Prije svega potrebno je definirati osnovne veličine gibanja, brzine koje se pojavljuju u relativnom koordinatnom sustavu. Radi lakšeg prikaza veličina odabran je, kao referentni geografski koordinatni sustav, kruti ortogonalni koordinatni sustav baznog vektora  $\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_i(\lambda, \phi, r, t)$  (Sl. B.1).



Sl. B.1 Geografski koordinatni sustav s generaliziranim koordinatama  $\mathbf{q}_i$  ( $i=\lambda, \phi, r$ ).  
Inercijalne osi  $x^1$  i  $x^2$  leže u ekvatorijalnoj ravnini dok se os  $x^3$  poklapa s osi rotacije Zemlje

Potrebno je razmotriti rotirajući koordinatni sustav čije je ishodište smješteno u središtu Zemlje te se podudara s ishodištem apsolutnog koordinatnog sustava. Vertikalna se os istog poklapa sa Zemljinom osi te na taj način omogućuje rotaciju cijelog relativnog koordinatnog sustava konstantnom kutnom brzinom  $\Omega = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Rotacija se vrši smjerom zapad – istok.

Ukoliko neka točka P, smještena u ovom koordinatnom sustavu, na površini Zemlje, ostaje fiksna u smislu da se zemljopisna dužina  $\lambda$ , zemljopisna širina  $\phi$  i vektor  $r$  koji određuju njen položaj ne mijenjaju s vremenom, govori se o krutoj rotaciji i pripadajućem krutom

koordinatnom sustavu. Iz Sl. B.1 je vidljivo da je rotacijska brzina točke P jednaka  $\mathbf{v}_\Omega$  i usmjerena duž jediničnog vektora  $\mathbf{q}_\lambda$  te iznosi:

$$\mathbf{v}_\Omega = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} \quad (\text{B.13})$$

Nadalje, ako razmotrimo gibanje fiksne točku na nekoj izobarnoj plohi nad Zemljinom površinom možemo zaključiti da se pored rotacionog gibanja brzinom  $\mathbf{v}_\Omega$  točka giba i uslijed topplinskih procesa u atmosferi koji deformiraju izobarnu plohu. Takav oblik deformiranja izobarne plohe uzrokuje pomak promatrane točke, a brzina promjene položaja opisuje se pomoću deformacijske brzine točke  $\mathbf{v}_D$ . Deformacije u smjeru položajnog vektora točke se mogu zanemariti zbog relativno velike udaljenosti točke od središta. Nasuprot tome, vertikalno se gibanje točke u većini slučajeva uzima u obzir. Ukupna brzina točke stoga iznosi

$$\mathbf{v}_P = \mathbf{v}_\Omega + \mathbf{v}_D. \quad (\text{B.14})$$

Položajni vektor  $\mathbf{r}$  se u Kartezijevom koordinatnom sustavu može izraziti u funkciji generaliziranih koordinata koristeći transformaciju  $x^i = x^i(q^j, t)$ :

$$\mathbf{r} = x^1 \mathbf{i}_1 + x^2 \mathbf{j}_2 + x^3 \mathbf{k}_3 = x^n \mathbf{i}_n, \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}(q^j, t) \quad (\text{B.15})$$

Primjenom operatora  $d/dt$  na vektor  $\mathbf{r}$  u apsolutnom i relativnom koordinatnom sustavu dobijemo:

$$\begin{aligned} \text{– apsolutni sustav } (x^i \text{ sustav}): \quad & \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right)_{x_i} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x_n} \frac{dx^n}{dt} = \left( \frac{\partial x_n}{\partial t} \right)_{x_i} \mathbf{i}_n + \dot{x}^n \mathbf{i}_n = \mathbf{v}_A \quad (\text{a}) \\ , \text{ uz } x^i = \text{konst. } \rightarrow & \left( \frac{\partial x_n}{\partial t} \right)_{x_i} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{– relativni sustav } (q^i \text{ sustav}): \quad & \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right)_{q_i} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^n} \frac{dq^n}{dt} = \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right)_{q_i} + \dot{q}^n \mathbf{q}_n = \mathbf{v}_P + \mathbf{v} \quad (\text{b}) \\ , \text{ uz } q^i = \text{konst. } \rightarrow & \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right)_{q_i} = \mathbf{v}_P \end{aligned}$$

$$\text{– vrijedi: } \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x^i} = \mathbf{i}_i, \quad \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} = \mathbf{q}_i$$

Kako je vrijeme  $t$  invarijanta, tj. ne ovisi o izboru koordinatnog sustava, izrazi (a) i (b) se mogu izjednačiti:

$$\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_P + \mathbf{v}, \quad (\text{B.16})$$

čime se dobije *teorem o zbrajanju brzina* koji kaže da je apsolutna brzina zraka  $\mathbf{v}_A$  jednaka zbroju brzine točke  $\mathbf{v}_P$  u apsolutnom koordinatnom sustavu i relativne brzine zraka  $\mathbf{v}$ .

## B.2.2 CENTRIFUGALNI POTENCIJAL

U meteorologiji rotacijski vektor Zemlje može biti tretiran kao konstantan vektor što znači da je u tom slučaju kutno ubrzanje Zemlje jednako nuli. Pozivajući se na pravilo vektorske analize koje kaže da svako vektorsko polje čiji je rotor jednak nuli može biti prikazano gradijentom skalarnog polja:

$$\nabla \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_\Omega) = 0 \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_\Omega = -\nabla \phi_z, \quad (\text{B.17})$$

Funkcija skalarnog polja  $\phi_z$  naziva se centrifugalni potencijal. Plohe  $\phi_z = \text{konstanta}$  predstavljaju cilindrične površine, dok potreban izraz za centrifugalni potencijal slijedi direktno iz uvjeta da je derivacija potencijala po pomaku jednaka negativnoj vrijednosti potencijalne funkcije:

$$\frac{d\phi_z}{dr} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_\Omega \quad \rightarrow \quad \phi_z = -\int \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) dr = -\frac{\Omega^2 R^2}{2} = -\frac{\mathbf{v}_\Omega^2}{2} \quad (\text{B.18})$$

, gdje je  $R$  najkraća udaljenost od proučavane točke do osi rotacije (Sl. B.1).

## B.2.3 JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA U GENERALIZIRANOM KOORDINATNOM SUSTAVU

Kako bismo izveli jednadžbu relativnog gibanja za generalizirani koordinatni sustav potrebno je na početku definirati generalizirani koordinatni sustav i njegove značajke. Generalizirani koordinatni sustav temelji se na tkz. baznim vektorima  $\mathbf{q}_i$  koji se pomoću *osnovnih metričkih veličina*  $g_{ij}$  transformiraju u jedinične vektore odabranog koordinatnog sustava  $\mathbf{e}_i$ .

$$g_{ij} = \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j \quad (\text{B.19})$$

$$\mathbf{e}_i = \frac{\mathbf{q}_i}{|\mathbf{q}_i|} = \frac{\mathbf{q}_i}{\sqrt{\mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_i}} = \frac{1}{\sqrt{g_{ii}}} \mathbf{q}_i, \quad (\text{B.20})$$

S obzirom da su bazni vektori  $\mathbf{q}_i$  ovisni o položaju i vremenu pojavljuju se u jednadžbama gibanja diferencijalni članovi sa baznim vektorima.

$$\frac{\partial g_{ij}}{\partial q^k} = \frac{\partial \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j}{\partial q^k} \quad (\text{B.21})$$

U tu svrhu uvodimo, bez detaljnijih izvoda<sup>38</sup>, *Christoffelove simbole*  $\Gamma_{ijk}$ .

$$\frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial q^j} = \Gamma_{ijk} \mathbf{q}^k, \quad \text{gdje je } \Gamma_{ijk} = \mathbf{q}_k \cdot \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial q^j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial g_{jk}}{\partial q^i} + \frac{\partial g_{ik}}{\partial q^j} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial q^k} \right) \quad (\text{B.22})$$

<sup>38</sup> Vidi Zdunkovski i Bott, 2003

Jednadžbe relativnog gibanja dobijemo iz osnovnih jednadžbi apsolutnog gibanja (B.11) te na temelju teorema (B.14) ona glasi

$$\frac{d\mathbf{v}_A}{dt} = \frac{d(\mathbf{v}_P + \mathbf{v}_D)}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \phi_a + \frac{1}{\rho} \nabla \mathbf{J}, \quad (\text{B.23})$$

gdje je  $\mathbf{v}_A = \mathbf{v}_P + \mathbf{v} = \mathbf{q}^n(v_n + W_n)$ . Pojedinačne derivacije stoga slijede

$$\mathbf{q}^n \frac{d\mathbf{v}_{A,n}}{dt} = \mathbf{q}^n \frac{dv_n}{dt} + \mathbf{q}^n \frac{dW_n}{dt} = -\frac{1}{\rho} \mathbf{q}^n \frac{\partial p}{\partial q^n} - \mathbf{q}^n \frac{\partial \phi_a}{\partial q^n} + \frac{1}{\rho} \nabla \mathbf{J}, \quad (\text{B.24})$$

gdje je  $\frac{dv_k}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v^n \nabla_n v_k = \frac{\partial}{\partial t} + \nabla_n v_k + v^n \Gamma_{kn}^m$  kovarijantni diferencijalni operator.

Razvojem diferencijalnih izraza  $\frac{dv_n}{dt}$  i  $\frac{dW_n}{dt}$  i nizom supsticija (Zdunkovski i Bott, 2003.)

dobija se konačni izraz za jednadžbu gibanja u relativnom generaliziranom koordinatnom sustavu te glasi

$$\begin{aligned} \frac{dv_k}{dt} - \frac{v_n v_m}{2} \frac{\partial g_{mn}}{\partial q^k} + 2v^n (\omega_{\Omega}^{nk} + \omega_D^{nk}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial q^k} - \frac{\partial \phi}{\partial q^k} + \frac{1}{\rho} \mathbf{q}_k \cdot \nabla \cdot \mathbf{J} \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial q^k} \left( \frac{v_D^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial t} W_D^k - 2W_D^n \omega_{\Omega}^{nk} \end{aligned} \quad (\text{B.25})$$

Novouvedena veličina  $\phi$  je jednaka zbroju gravitacijskog i centrifugarnog potencijala te je poznatija pod nazivom *geopotencijal* ( $\phi = \phi_a + \phi_z$ ) gdje je  $\phi_z = -\frac{\mathbf{v}_{\Omega}^2}{2}$ .

#### B.2.4 JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA U ORTOGONALNOM KOORDINATNOM SUSTAVU

Razmotriti ćemo pojednostavljenu verziju jednadžbe relativnog gibanja na način da se zanemari deformacijska brzina  $\mathbf{v}_D$  ( $\mathbf{v}_D = 0$ ) uzimajući u obzir krutost koordinatnih linija ortogonalnog Kartezijevog koordinatnog sustava te činjenicu da nedijagonalni članovi tenzora  $g_{ij}$  nestaju iz uvjeta ortogonalnosti

$$|\mathbf{q}_i \perp \mathbf{q}_j, \forall i \neq j| \rightarrow g_{ij} = \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{q}_j = 0, \forall i \neq j. \quad (\text{B.26})$$

Pojednostavljenjem jednadžbe (B.25) slijedi

$$\frac{dv_k}{dt} - \frac{v_n v_n}{2} \frac{\partial g_{nn}}{\partial q^k} + 2v^n \omega_{\Omega} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial q^k} - \frac{\partial \phi}{\partial q^k} + \frac{1}{\rho} \mathbf{q}_k \cdot \nabla \cdot J . \quad (\text{B.27})$$

Prijelaz na ortogonalni koordinatni sustav zahtijeva sukladno (B.19) množenje jednadžbi (B.27) sa  $1/\sqrt{g_{kk}}$  i deriviranje istog člana u prva dva člana lijeve strane jednadžbe na sljedeći način

$$-\frac{1}{2} \frac{v^n v^n}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{\partial g_{nn}}{\partial q^k} = -\frac{v^n v^n}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{g_{nn}}{\sqrt{g_{nn}}} \frac{\partial \sqrt{g_{nn}}}{\partial q^k} = -\frac{\hat{v}^n \hat{v}^n}{\sqrt{g_{nn}}} \frac{\partial \sqrt{g_{nn}}}{\partial \hat{q}^k}$$

i

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{dv_k}{dt} &= \frac{d}{dt} \left( \frac{v_k}{\sqrt{g_{kk}}} \right) - v_k \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\sqrt{g_{kk}}} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{v_k}{\sqrt{g_{kk}}} \right) + \frac{v_k}{g_{kk}} \frac{d\sqrt{g_{kk}}}{dt} \\ \frac{1}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{dv_k}{dt} &= \frac{d\hat{v}_k}{dt} + \hat{v}_k \left( \frac{1}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{\partial \sqrt{g_{kk}}}{\partial t} + \frac{\hat{v}_n}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{\partial \sqrt{g_{kk}}}{\partial \hat{q}^n} \right) \end{aligned} . \quad (\text{B.29})$$

**Jednadžba relativnog gibanja u ortogonalnom koordinatnom sustavu** uz rastav lokalne vremenske promjene brzine  $\frac{d\hat{v}}{dt} = \frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \hat{v}$  te zapisana u obliku prikladnom za fizikalno tumačenje pojedinih sastavnih članova konačno glasi

$$\begin{aligned} (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \\ \frac{\partial \hat{v}_k}{\partial t} + \hat{v}_k \cdot \nabla \hat{v}_k + \hat{v}_k \left( \frac{\hat{v}_k}{\sqrt{g_{kk}}} \frac{\partial \sqrt{g_{kk}}}{\partial \hat{q}^n} - \frac{\hat{v}_n}{\sqrt{g_{nn}}} \frac{\partial \sqrt{g_{nn}}}{\partial \hat{q}^k} \right) + 2\hat{v}^n \hat{\omega}_{\Omega} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \hat{q}^k} - \frac{\partial \phi}{\partial \hat{q}^k} + \frac{1}{\rho} \mathbf{e}_i \cdot \nabla \cdot J \quad (\text{B.30}) \\ (5) \quad (6) \quad (7) \end{aligned}$$

(1) lokalna promjena brzine s vremenom, tj. ubrzanje zraka u relativnom koordinatnom sustavu

(2) nelinearni član koji predstavlja advekciju,

(3) tkz. *metrično ubrzanje*, fiktivno ubrzanje koje rezultira iz odabira koordinatnog sustava, a ne iz interakcija fluida i ostalih tijela te ne vrši nikakav rad.

(4) Coriolisova sila, tj. fiktivna (pseudo) sila koja je posljedica gibanja u rotirajućem koordinatnom sustavu. Kako ta sila uzrokuje otklon od pravocrtnog gibanja, zrak koji se giba sa relativnom brzinom  $\mathbf{v}$ , bit će usmjerjen udesno na sjevernoj hemisferi i ulijevo na južnoj hemisferi. Ova sila ne vrši nikakav rad.

(5) gradijent tlačnih sila (nastaje zbog kretanja parcele zraka iz područja većeg tlaka prema području manjeg tlaka)

- (6) kombinacija gravitacijske i centrifugalne sile u jedinstvenu silu koja se naziva *relativna gravitacija*
- (7) utjecaj sila trenja

### B.2.5 RASTAVLJANJE JEDNADŽBE RELATIVNOG GIBANJA

Meteorološke prognostičke i dijagnostičke varijable određuju se na temelju jednadžbi relativnog gibanja koje je u svrhu njihovog kvantificiranja potrebno dekomponirati na tri komponente odabranog koordinatnog sustava. Kako bi to ostvarili potrebno je prepostaviti da su geopotencijalne plohe sferne plohe nad kojim je moguće postaviti geografski koordinatni sustav čije svojstvo ortogonalnosti osigurava pojednostavljeni oblik jednadžbi gibanja te je u potpunosti određen sa samo tri osnovne metričke veličine  $g_{ij}$

$$g_{11} = r^2 \cos^2 \varphi, \quad g_{22} = r^2, \quad g_{33} = 1, \quad g_{ij} = 0 \quad \forall \quad i \neq j, \quad (\text{B.31})$$

a koje proizlaze iz definicije jediničnih vektora geografskog koordinatnog sustava na sfernoj plohi  $r$ .

Međutim, kako za potpuno shvaćanje problema nije potrebno razumjeti postupak izvoda kojim se došlo do potrebnih jednadžbi, u ovom radu će on biti zanemaren te će se objasniti samo konačno dobivene jednadžbe.

Jednadžba relativnog gibanja rastavljena na tri jednadžbe u **sfernem koordinatnom sustavu** glasi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left( u \frac{\partial u}{\partial \lambda} + v \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uw}{r} - \frac{uv}{r} \tan \varphi + lw - fv + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \lambda} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left( u \frac{\partial v}{\partial \lambda} + v \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{vw}{r} - \frac{u^2}{r} \tan \varphi + fu + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \left( u \frac{\partial w}{\partial \lambda} + v \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{r} (u^2 + v^2) - lu + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + g = 0 \quad (3)$$

$$(4) \quad (5) \quad (6) \quad (7) \quad (8) \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left( u \frac{\partial v}{\partial \lambda} + v \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{vw}{r} - \frac{u^2}{r} \tan \varphi + fu + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0 \quad (1)$$

$$(2) \quad (3) \quad (4) \quad (5) \quad (7) \quad (8) \quad (B.32)$$

$$(1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (6) \quad (8) \quad (9)$$

, gdje vrijedi:

$$\frac{\partial}{\partial \lambda}^* = \frac{1}{r \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \quad \text{i} \quad \frac{\partial}{\partial \varphi}^* = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}$$

$u$ ,  $v$  i  $w$  – komponente brzine

$l = 2\Omega \cos \varphi$ ,  $f = 2\Omega \sin \varphi$  – komponente vektora kutne brzine zemlje (*Coriolisovi parametri*) sastavni dijelovi komponenti Coriolisove sile  $2\Omega \times \mathbf{v} = (lw - fv)\mathbf{e}_\lambda + fu\mathbf{e}_\varphi - lu\mathbf{e}_r$ ,

$g$  – gravitacijsko ubrzanje;

U planetarnom graničnom sloju koji se proteže do 2km iznad Zemlje, tj. u području koji nam je zanimljiv za proučavanje, utjecaji sila trenja se obično zanemaruju.

Slijedi detaljan opis pojedinih sastavnih članova prikazanih jednadžbi koji su označeni oznakama (1), (2), ... (8):

(1) predstavlja lokalnu promjenu komponente brzine s vremenom  $t$

(2) i (3) određuju horizontalnu i vertikalnu advekciju, respektivno

(4) i (5) predstavljaju fiktivne (pseudo) sile po jedinici mase, a poznate su pod nazivom *metrička ubrzanja*. Proizlaze iz derivacije baznih vektora unutar advektivnog člana jednadžbe. Pseudo sile nisu rezultat interakcije zraka s drugim tijelima već su posljedica gibanja u rotirajućem koordinatnom sustavu te ne vrše nikakav rad

(6) i (7) članovi koji su posljedica djelovanja Coriolisove sile

(8) sila gradijenta tlaka (usmjerena od područja visokog tlaka prema području niskog tlaka)

(9) određuje ubrzanje zbog gravitacije koje ovisi o položaju promatrača na Zemljinoj površini, tj. o veličinama  $\varphi$  i  $r$  (Sl. 3.2.). Često se u primjeni ovisnost gravitacijskog ubrzanja o visini može zanemariti, tj.  $g = g(\varphi)$ . Također nije neobično da se ne zahtijeva ni veoma precizna ovisnost o  $\varphi$ . U tim se slučajevima uzima da je  $g$  konstanta s pripadnom vrijednošću  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

## B.2.6 JEDNADŽBA RELATIVNOG GIBANJA U STEREOGRAFSKOM KARTEZIJEVOM KOORDINATNOM SUSTAVU

Primjena kutijastih modela pri modeliranju trodimenzionalnog atmosferskog stanja u većini slučajeva zahtijeva korištenje pravokutne koordinatne mreže Kartezijevog koordinatnog sustava u projekcijskoj ravnini zemljine površine. Postoji niz stereografskih projekcijskih metoda od kojih je pri analizi atmosferskih stanja najpogodnija ona projekcija koja je u stanju očuvati pravilan geometrijski odnos kuteva između paralela i meridijana, tkz. *konformna projekcija*. Među najraširenije konformne projekcije pripadaju konične, polarne i ekvatorijalne stereografske projekcije.

Pored očuvanja pravilnih kuteva, potrebno je omogućiti što točniji prijenos udaljenosti sa sfere na projekcijsku ravninu. U tu svrhu se uvode faktori za skaliranja  $m$ , tkz. *kartografski faktori*, koji definiraju odnos stereografske projicirane dužine i stvarne dužine na zemljinoj površini ili nekoj sfernoj plohi radijusa  $r$ . Jednadžbe relativnog gibanja za stereografski Kartezijev koordinatni sustav stoga glase,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u}{\partial t} + m_0 \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uw}{r} - \frac{uv}{r} \tan \varphi + lw - fv + v(u \frac{\partial m_0}{\partial x} - v \frac{\partial m_0}{\partial y}) + \frac{m_0}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{vw}{r} + \frac{u^2}{r} \tan \varphi + fu - u(v \frac{\partial m_0}{\partial x} - u \frac{\partial m_0}{\partial y}) + \frac{m_0}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \quad (\text{B.33}) \\
 \frac{\partial w}{\partial t} + \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} \right) + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{r} (u^2 + v^2) - lu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g &= 0.
 \end{aligned}$$



## **Životopis**

Marko Čavrak rođen je 19. siječnja 1977. godine u Rijeci, Republika Hrvatska u obitelji diplomiranog inženjera i profesorice glazbene kulture. Nakon završenog srednjoškolskog obrazovanja u Gimnaziji Andrija Mohorovičić u Rijeci 1995. godine upisuje se na sveučilišni diplomski studij pri Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, smjer Strojarstvo. Kao redovni student uspješno savladava zadane zadatke te biva u nekoliko navrata nagrađivan za uspjeh tijekom studijskih godina kao i za uspjeh tijekom cijelog studija. Diplomski rad pod nazivom „*Komputersko simuliranje disperzije i konvekcije onečišćenja zraka*“ obranio je sa odličnim uspjehom. Studij također završava sa odličnim uspjehom.

Od veljače 2002. godine zaposlenik je Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, u Zavodu za tehničku mehaniku i računarsko inženjerstvo kao znanstveni novak. Sudjeluje u nastavi i komentorira mnogim studentskim seminarским i diplomskim radovima. Bavi se strujanjima fluida iz industrijskih dimnjaka i atmosferskim strujanjem kao i raznim oblicima strujanja fluida u strojarskoj opremi. Autor je jednog znanstvenog rada. Aktivno se služi engleskim, a pasivno njemačkim i talijanskim jezikom.

## **PODACI O AUTORU I MAGISTARSKOM RADU**

### **1. AUTOR**

Ime i prezime:

Datum i mjesto rođenja:

Naziv fakulteta, studija i godina  
završetka dodiplomskog studija:

Naziv fakulteta, studija i godina  
završetka poslijediplomskog studija:

Sadašnje zaposlenje:

Marko Čavrak, dipl. ing.

19. siječnja 1977. godine, Rijeka

Tehnički fakultet Rijeka, studij  
strojarstva, 2001.

Tehnički fakultet Rijeka, usmjerenje  
Računarska mehanika, 2006.

Znanstveni novak

### **2. MAGISTARSKI RAD**

Naslov:

Broj stranica, slika, tablica i  
bibliografskih podataka:

Znanstveno polje i grana:

Voditelj rada:

Fakultet na kojem je rad obranjen:

Modeliranje i simulacija onečišćenja zraka  
nad širim riječkim područjem

v+137 stranica, 64 slika, 27 tablica,  
39 bibliografskih podataka

Druge temeljne tehničke znanosti  
Tehnička mehanika i mehanika fluida  
prof. dr.sc. Zoran Mrša, dipl. ing.

Tehnički fakultet Rijeka

### **3. OBRANA I OCJENA**

Datum prijave teme:

9. prosinca 2005. god.

Datum predaje rada:

1. rujna 2006. god.

Sastav povjerenstva za ocjenu:

red.prof.dr.sc. Zoran Mrša

red.prof.dr.sc. Luka Sopta

svi sa *Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*

red. prof. dr.sc Zdravko Virag

*Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu*

Datum obrane:

15. prosinca 2006. god.

Sastav povjerenstva za obranu:

red.prof.dr.sc. Zoran Mrša

red.prof.dr.sc. Luka Sopta

svi sa *Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*

red. prof. dr.sc Zdravko Virag

*Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu*

Datum promocije: \_\_\_\_\_

Oznaka: MR Tek. Broj:

UDK 614.72:551.551.61:504.5:621.43.064:  
662.6/.7(497.5 RIJEKA)(043)

## MODELIRANJE I SIMULACIJA ONEČIŠĆENJA ZRAKA NAD ŠIRIM RIJEČKIM PODRUČJEM

**Marko Čavrak**

Sveučilište u Rijeci  
Tehnički fakultet  
Hrvatska

**Ključne riječi:** modeliranje onečišćenja zraka, kemijski transportni model, izvori emisija

**Sažetak:** Ovaj magistarski rad prikazuje uspješnu operativnu implementaciju modelirajućeg sustava MM5-SMOKE-CMAQ kao korisnog alata pri određivanju razine kakvoće zraka nad regionalnim i urbanim područjem. Modeliranje je provedeno za ljetni period sa visokom razinom troposferskog ozona tijekom 2005 godine. Analizirane su prostorne i vremenske rezolucije modela te utvrđena optimalna veličina računalnih domena i rezolucija numeričkih mreža kako bi omogućila uvid u mezoskalne i lokalne meteorološke fenomene nad područjem izrazito kompleksne orografije. Koristeći prikupljene rezultate mjerjenja iz desetak mjernih stanica u okolini Rijeke izvršena je evaluacija sustava za modeliranje kakvoće zraka MM5-SMOKE-CMAQ. U zaklučku je prikazana ocjena provedenog istraživanja i smjernice za daljnja istraživanja.

Rad nije objavljen.

Mentor: prof.dr.sc. Zoran Mrša, dipl. ing.

Povjerenstvo za ocjenu: red.prof.dr.sc. Zoran Mrša

red.prof.dr.sc. Luka Sopta

svi sa Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci

red. prof. dr.sc Zdravko Virag

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Povjerenstvo za obranu: red.prof.dr.sc. Zoran Mrša

red.prof.dr.sc. Luka Sopta

svi sa Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci

red. prof. dr.sc Zdravko Virag

Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Datum obrane: 15. prosinca 2006.

Datum promocije: \_\_\_\_\_

Rad je pohranjen na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.

(v+137 stranica, 64 slika, 27 tablica, 39 bibliografskih podataka, hrvatski jezik)

MR

I. Modeliranje i simulacija onečišćenja zraka nad  
širim nježkim područjem

1.

izvođeni emisija  
kemijski transportni model,  
modeliranje onečišćenja zraka,  
Ključne riječi:

Hrvatska

Themički fakultet

II. Sveučilište u Rijeci

I. Čavrat, M.

UDK

662.6/.7(497.5 RIJEKA)(043)  
614.72.551.551.61.504.5.621.43.064.

Code: MR

No. \_\_\_\_\_

UDC 614.72:551.551.61:504.5:621.43.064:  
662.6/.7(497.5 RIJEKA)(043)

## AIR QUALITY MODELING AND SIMULATION AT RIJEKA'S REGIONAL AREA

**Marko Čavrak**

University of Rijeka  
Faculty of Engineering  
Croatia

**Keywords:** air quality modelling, chemical transport model, emission sources

**Summary:** The high levels of air pollutants have a strong influence both on ecosystems and human health. Air quality modelling is becoming essential to understand atmospheric processes under which the pollution from industrial complexes, road traffic and other emission sources influence the dynamics of environment. In this master thesis a coupled multiscale-nested air quality modelling system MM5-SMOKE-CMAQ was implemented as a useful tool to assess regional air quality issues. Modelling was conducted for a period of high ozone levels during summertime of 2005. Measured data from 10 stations in Rijeka's wider area were collected and compared against results of simulations under different modelling parameters. Different spatial and temporal model resolutions were analyzed and conclusion that high resolution is necessary for describing and capturing mesoscale phenomena over complex terrain area were derived. The work concludes with future research proposals.

This thesis has not been published.

Mentor: Prof. D. Sc. Zoran Mrša, dipl. ing.

Advisors: Prof. D. Sc.. Zoran Mrša

Prof. D. Sc. Luka Sopta

(*Faculty of Engineering, Rijeka*)

Prof. D. Sc. Zdravko Virag

(*Faculty of Mech. Eng. and Naval Archit., Zagreb*)

Reviewers: Prof. D. Sc. Zoran Mrša

Prof. D. Sc. Luka Sopta

(*Faculty of Engineering, Rijeka*)

Prof. D. Sc. Zdravko Virag

(*Faculty of Mech. Eng. and Naval Archit., Zagreb*)

Presentation: 15.12.2006.

Degree conferred: \_\_\_\_\_

This thesis is deposited in the library of University of Rijeka, Faculty of Engineering  
(v+137 pages, 64 figures, 27 tables, 39 bibliographic references, croatian language)

Croatia  
Faculty of Engineering

II. University of Rijeka  
I. Čavrank, M.

Faculty of Engineering

II. University of Rijeka

I. Čavrank, M.

regional area  
1. Air quality modeling and simulation at Rijeka's

662.6/7(497.5 RIJEKA)(043)

614.72:551.551.61:504.5:621.43.064:

UDC

MR

emission sources  
chemical transport model,  
air quality modeling,  
Key words: