

3.4.3 Prizemne inverzije nad Zagrebom

U problemu zagađivanja zraka prizemne inverzije zauzimaju specijalno mjesto, jer u kombinaciji sa slabim strujanjem čine, s meteorološke strane, najpovoljnije uvjete za visoke koncentracije zagađenosti dimom i SO₂.

Prizemne su inverzije definirane porastom temperature počevši od tla pa do neke visine u najnižem sloju troposfere, čija debljina ne prelazi 1 km.

Za upoznavanje prizemnih inverzija u našem gradu koristio se niz radiosondažnih podataka o temperaturi iz perioda od 12 godina i 4 mjeseca i to od 1.IX 1959. do 31.XII 1971. u 01 sat, i od 1.VII 1960. do 31.III 1963., te od 1.I 1966. do 31.XII 1971. godine u 13 sati. Prema tome, o egzistenciji prizemnih inverzija zaključivalo se samo na osnovi radiosondažnih mjerenja u 01 sat, odnosno 13 sati.

Ukoliko je prizemna inverzija nastala i nestala u vremenu između dva radiosondažna mjerenja (noćnog i podnevnog), ona se na ovaj način nije mogla obuhvatiti. Međutim, takvi slučajevi su rijetki, jer je postanak inverzija (radijacione inverzije) najčešće vezan s ohladjivanjem sloja zraka neposredno uz tlo, do čega dolazi u toku noćnog izžarivanja podloge.

Što se tiče inverzija zabilježenih u 13 sati, one se javljaju samo u hladnom dijelu godine, kada su efekti izžarivanja toliki, (osobito kod mirnog vremena i još uz prisutnost snježnog pokrivača) da se inverzija zadrži i cijeli dan.

Statistička analiza inverzija za potrebe proučavanog problema zagađenosti zraka i meteoroloških prilika izvedena je tako, da se dobije uvid o učestalosti njihova pojavljivanja kroz cijelu godinu, o najvjerojatnijoj debljini inverzionih slojeva, te o njihovu trajanju. Pri tome su se koristili rezultati studije o inverzijama autora D.Poje (*Poje, 1970.*) nad Zagrebom.

3.4.3.1 Učestalost pojavljivanja prizemnih inverzija

Osnovna, iako i najgrublja informacija o inverzijama u Zagrebu je prosječna učestalost njihova pojavljivanja (izražena srednjim brojem dana), koja je prikazana po mjesecima i za godinu u tabeli 3-2. U istoj tabeli naveden je, za svaki mjesec u promatranih 12 godina najveći i najmanji broj dana s prizemnom inverzijom.

U svim mjesecima, pa tako i u godini, prosječni broj dana s prizemnom inverzijom je vrlo velik. Odstupanja od srednjeg broja dana predočena su maksimalnim, odnosno minimalnim brojem dana.

Tabela 3-2. Prosječni broj dana s prizemnim inverzijama, Zagreb-Maksimir 01^h, 13^h 1.IX 1959-31.XII 1971.

Mjes. Term.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
Sred. 01	18,3	17,6	17,7	20,3	23,5	24,6	26,3	24,1	24,2	24,8	18,8	16,5	256,7
Sred. 13	4,0	2,2	0,3	-	-	-	-	-	-	-	0,9	2,1	9,5
Maks. 01	26	29	26	27	28	27	29	31	30	31	26	28	296
Maks. 13	11	6	2	-	-	-	-	-	-	-	5	9	28
Min. 01	11	10	10	17	20	20	21	15	18	17	13	8	230
Min. 13	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	2	1	4

Iz tabele je očito da su inverzije u 13 sati osobina samo mjeseci hladnog dijela godine, kao i to da, u prosjeku, najveći broj noćnih inverzija pripada ljetu.

Medjutim, karakter inverzija toplog i hladnog dijela godine toliko se razlikuje, da je važnost ljetnih inverzija za problem zagađenosti zraka beznačajna u odnosu na zimske, koje se ističu svojom stacionarnošću (duljinom trajanja).

Srednji broj dana s inverzijama, koji zimi u 01 sat iznosi 52,4 dana, a u 13 sati 8,3 dana, ukazuje da se u toj sezoni može očekivati, u 58% slučajeva, pojava noćnih inverzija, a vjerojatnost da će se neke od njih zadržati najmanje 1/2 dana je oko 20%, prema rezultatima točke 3.4.3.3.

3.4.3.2 Debljine prizemnih inverzija

Koncentracije polutanata pri tlu, promatrane s obzirom na visinu izvora zagađenja, pokazuju određenu ovisnost o debljini prizemnih inverzija.

Debljina prizemnih inverzija promatrana je, u sloju od tla do visine od 1000 m na taj način, da je taj sloj podijeljen u klase, kako je navedeno u tabeli 3-3.

Debljina prizemne inverzije definira se visinom njene gornje granice, iznad koje temperatura s visinom uglavnom stalno pada.

Prema relativnim frekvencijama, navedenim u tabeli 3-3, vidi se da su u proljeće, ljetu i jesen, te u godini gledanoj kao cjelini, najvjerojatnije inverzije čija se debljina kreće od 100 do 150 m. Jedino je zimi povećana vjerojatnost nižih inverzija, debljine 50 do 100 m, kao i onih najplićih,

debljine do 50 m. U ovoj sezoni ističu se, po relativnoj učestalosti nastupa od 17.9%, još uvijek relativno niske inverzije, čija gornja granica pripada klasi 101-150 m. Od inverzijskih slojeva veće debljine česti su i oni (13.3%), čija gornja granica leži između 200 i 300 m.

Tabela 3-3. Relativna frekvencija gornje granice prizemnih inverzija u Zagrebu (%) u 01 i 13 sati
1.IX 1959-31.XII 1971.

Sezona Visina nad tlom	Zima		Proljeće		Ljeto		Jesen		Godina	
	01	13	01	13	01	13	01	13	01	13
	0- 50	13.7	3.8	9.4	-	7.4	-	5.3	-	8.7
51- 100	22.4	7.7	29.4	100.0	26.4	-	20.1	-	24.7	8.8
101- 150	17.9	11.7	32.0	-	27.6	-	29.9	-	27.3	10.6
151- 200	9.1	11.7	9.3	-	11.8	-	12.4	12.5	10.7	11.5
201- 300	13.3	15.6	8.3	-	15.4	-	12.4	12.5	12.3	15.1
301- 400	9.5	9.8	6.4	-	6.5	-	8.9	25.0	7.8	10.6
401- 500	6.6	9.7	1.1	-	2.2	-	4.7	37.5	3.5	11.5
501-1000	7.5	30.0	4.1	-	2.7	-	6.3	12.5	5.0	28.4

Podaci o relativnim frekvencijama poslijepodnevni (13-satnih) prizemnih inverzija pokazuju, da su vjerojatniji inverzijski slojevi većih debljina, a zimi najveća vjerojatnost pri tome pripada slojevima čija se gornja granica nalazi čak između 500 i 1000 m.

Ovakav odnos jutarnjih i poslijepodnevni inverzija, vidljiv još u jesen i kroz cijelu godinu, pokazuje da kod noćnih inverzija dolazi češće do izražaja radijaciona komponenta njihovog postanka, a kod dnevnih advektivna, u vezi sa strujanjem toplog zraka iznad hladnije podloge.

Iako su u svim sezonama najčešće prizemne inverzije čija se gornja granica nalazi u prve tri klase do 50, do 100 i do 150 metara nad tlom, ipak njihovo značenje u problemu onečišćenja zraka varira od sezone do sezone. Naime, zimske inverzije navedenih debljina do 150 m, zbog manjeg efekta dnevnog zagrijavanja prizemnog sloja zraka, traju dulje no što je to slučaj u toplom dijelu godine, kada je radijacija već toliko intenzivna, da inverzija iste debljine kao zimi nestaje nekoliko sati nakon izlaska Sunca. Zbog toga je vjerojatnije pojavljivanje prizemnih inverzija istih debljina u hladnom dijelu godine (prvenstveno zimi), nego u toplom.

Uloga debljine prizemnih inverzija u problemu zagađenja vrlo je interesantna, jer njihova gornja granica djeluje kao prirodna prepreka širenju polutanata.

Ako je visina izvora zagađenja manja od debljine inverzionog sloja, tada se zagađenje zadržava ispod njene gornje granice i širi samo prema tlu. Međutim, ako je visina izvora veća od debljina inverzionog sloja, tada se zagađenje širi iznad te barijere i uopće ne dopire do tla.

Pošto visine dimnjaka kućnih ložišta u Zagrebu pripadaju redu veličine od nekoliko desetaka metara, to će pri njihovoj emisiji svi inverzioni slojevi navedeni u tabeli 3-3 pogodovati gomilanju SO_2 i dima u najdonjem sloju uz tlo. U takvim slučajevima, ovisno i o intenzitetu strujanja i trajanju inverzija, nastaju maksimalna zagađenja u Zagrebu.

Dimnjaci industrijskih objekata, čija se visina kreće oko 100 m ili više, djeluju kao zagađivači sloja zraka uz tlo samo onda, kada je gornja granica inverzionog sloja iznad otvora dimnjaka. Međutim, u slučajevima kada se otvor dimnjaka nalazi iznad plitkih prizemnih inverzija, (prve dvije kolone u tabeli 3-3) emisija iz takvih izvora ne učestvuje u zagađivanju zraka u sloju ispod gornje granice inverzije.

3.4.3.3 Trajanje prizemnih inverzija

Za upoznavanje trajanja prizemnih inverzija korišteni su podaci radiosondažnih mjerenja od 01 i 13 sati iz perioda od 6,5 godina. Ukoliko je prizemna inverzija zabilježena u dva uzastopna mjerenja, tada se uzima da je trajala 12 sati, ako postoji u 3 uzastopna mjerenja, onda se njeno trajanje povećava na 24 sata, itd.

Na taj način određene su vrijednosti trajanja prizemnih inverzionih slojeva (tabela 3-4). Trajanje prizemnih inverzija moguće je konstatirati samo ako je jednako ili veće od 1/2 dana (12 sati), što je slučaj samo u hladnom dijelu godine.

Prema tome dolazimo do karakteristike prizemnih inverzija I, II, III, XI i XII mjeseca, koja povećava značenje ovog meteorološkog parametra u onečišćenju atmosfere spomenutih mjeseci. Vjerojatnosti trajanja inverzija, navedene u tabeli 3-4, odnose se na ukupan broj dana s inverzijom u pojedinom mjesecu. To znači da se u siječnju, od ukupnog broja inverzija, s vjerojatnošću od 2.1% mogu očekivati inverzije u trajanju od samo 1/2 dana. Češće se mogu očekivati inverzije koje traju 1 dan, jer njihova vjerojatnost iznosi čak 3.6%. Inverzije čiji period trajanja prelazi 1 dan rijetka su pojava ne samo u siječnju, nego i u ostalim mjesecima.

Tabela 3-4. Vjerojatnosti trajanja prizemnih inverzionih slojeva nad Zagrebom (u %)
 1.VII 1960-31.III 1963.
 1.I 1966-31.VIII 1969.

Mjes. Trajanje	I	II	III	XI	XII
1/2 dana	2.1	3.8	-		-	2.1
1 dan	3.6	2.2	0.6		1.1	3.7
1 1/2 dan	0.5	-	-		-	1.1
2 dana	1.6	0.5	-		-	0.5
2 1/2 dana	0.5	-	-		-	-
3 dana	-	0.5	-		-	-
Σ	8.3	7.0	0.6		1.1	7.4

Upravo u zimskim mjesecima (zadnji red tabele 3-4) vjerojatnost da će periodi trajanja inverzija iznositi 12 sati i više očito je tako velika, da se može smatrati klimatskom karakteristikom prizemnih inverzija našeg grada, koja u vezi sa slabim strujanjem čini optimalne uvjete za visoke koncentracije SO₂ i dima.

3.5

PROVJETRANJE GRADA

Provjetranje odnosno aeracija grada najvažniji je prirodni faktor u borbi protiv zagađenja. S tog aspekta nastojalo se svestrano razmatrati režim strujanja nad Zagrebom da bi se ustanovilo u kolikoj mjeri vjetrovi u Zagrebu mogu "očistiti" gradski zrak - ili ima li strujanje iz nekog određenog smjera negativan upliv na zagađenost u centru grada.

Vjetar je jedini meteorološki element kod kojeg se mjere dvije veličine: jačina (u Beaufort-ovoj skali) ili brzina (mps, km/sat), te smjer. Zato ispitivanje korelacija režima strujanja i zagađenosti gradskog zraka razmatra upliv brzine vjetra na koncentracije SO₂, zatim karakteristike pojedinog smjera vjetra te upliv na općenitu koncentraciju SO₂ kao i na njen raspored na području grada, i konačno opću sliku strujanja nad gradom. Specifičnost u režimu strujanja nad Zagrebom uvjetuje blizina Medvednice, (Sljeme, 1035 m), koja modificira opću sliku strujanja, te uzrokuje specifičan

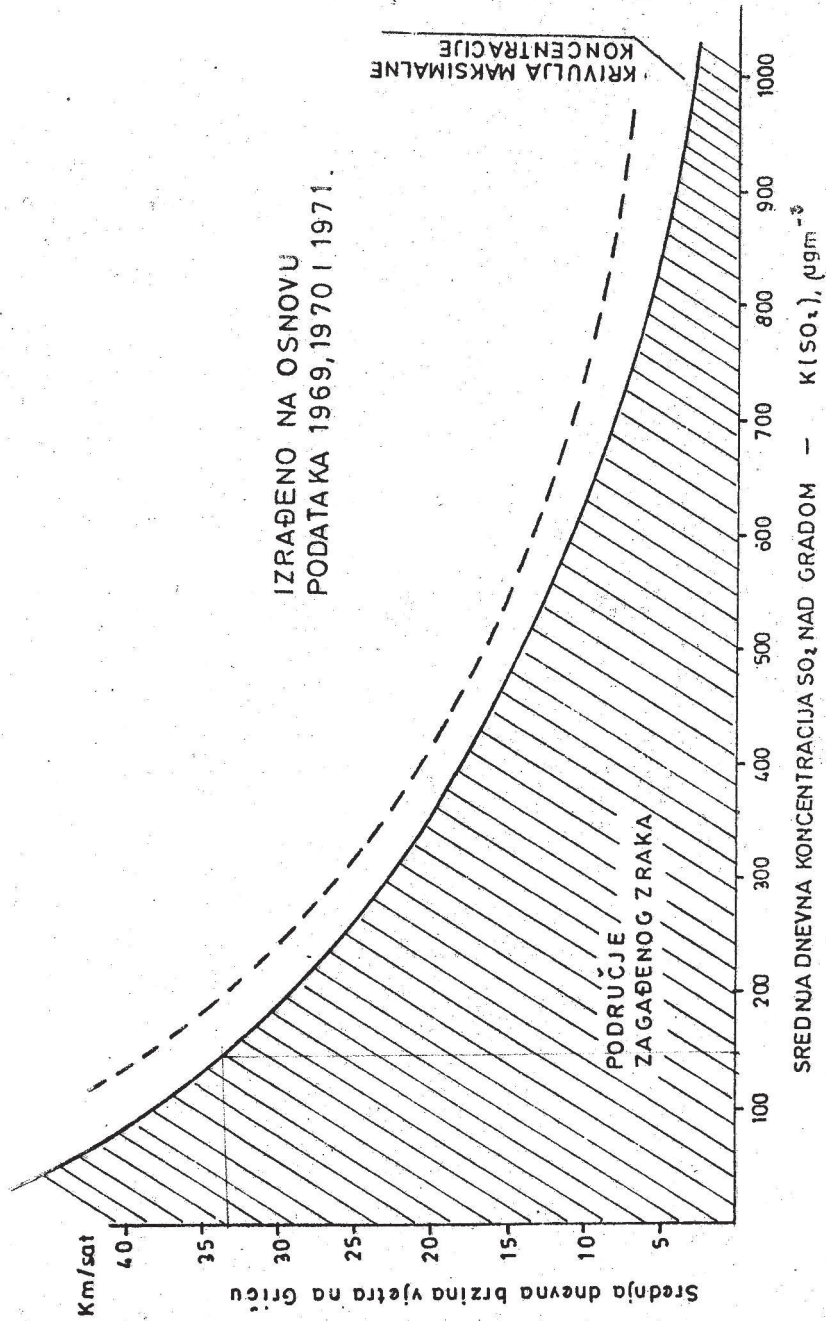
dnevni hod smjera i brzine vjetra. Svaki od spomenutih parametara u režimu strujanja obradjen je posebno, da bi se na kraju dobila kompleksna slika strujanja i zagadjenosti u centru grada.

Čitav ovaj kompleks parametara strujnog režima nad gradom jako otežava istraživanje u cjelini. Poseban problem u Zagrebu čini vrlo rijetka mreža mjernih punktova vjetra (i ostalih meteoroloških elemenata). Medjutim, za ocjenu "provjetravanja" centra Zagreba pokazao se pogodnim položaj i visina meteorološkog opservatorija na Griču. Svojom visinom od 157 metara iznad razine mora, pri čemu je instrument za registraciju brzine i smjera vjetra smješten na krovu zgrade 23.0 m iznad tla, ovaj opservatorij daje podatke o režimu strujanja na visini od 50 metara iznad većeg dijela centra grada Zagreba (a na 23 m iznad Gornjeg grada). Strujanje na ovoj visini može se smatrati karakterističnim za užu centar grada, jer se odvija u najnižem sloju atmosfere iznad grada, u kome više nema usko lokalnih upliva zgrada i ulica grada.

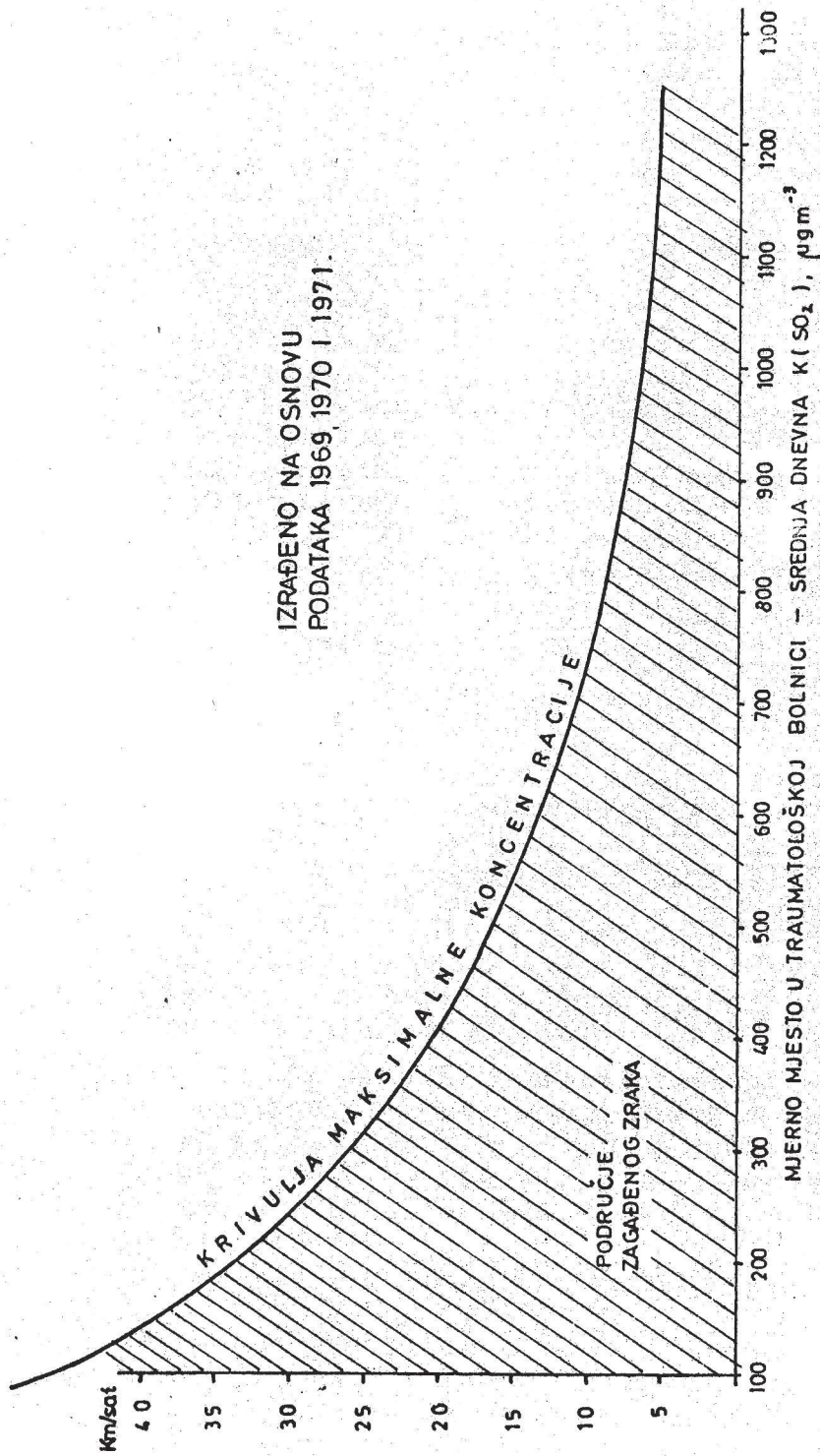
3.5.1 Brzina strujanja i "provjetravanje"

Brzina vjetra mijenja se s visinom. Najmanja je uz tlo, zbog trenja, a zatim raste s visinom, dosta brzo na otvorenom terenu, a sporije u gradu. Posebno u gradu, vjetar određenog smjera bit će modificiran u ulicama, i to tako da je strujanje u ulicama, koje su u smjeru vjetra, pojačano, dok je u ulicama okomitim na smjer vjetra usporeno, uz pojačane turbulentne vrtloge. U zavjetrini zgrada stvaraju se tzv. "aerodinamične sjene", u kojima često dolazi do porasta koncentracije zagadjenosti zraka. Toplinski efekt podloge izaziva u nekim dijelovima grada jačanje vertikalnih strujanja, a razlika između temperature gradskog područja ("toplinska kapa" nad gradom) i okoline može u određenim stacionarnim ("mirnim") vremenskim situacijama izazvati dodatne cirkulacione krugove strujanja zraka iz grada u višim slojevima, a natrag prema gradu u nižim slojevima.

Za sve dane tokom 1969, 1970 i 1971., kada su mjerne koncentracije SO_2 na sedam stalnih mjernih mjesta u Zagrebu, izračunata je srednje brzina vjetra za periode od 13h jednog dana do 13h idućeg dana, kroz koje se mjeri koncentracija SO_2 . Korištene su registracije anemografa na Griču. Srednje brzine vjetra usporedjivane su sa srednjim dnevnim koncentracijama SO_2 . Ukupno je ispitan uzorak od oko 600 dana. Kao ocjena opće razine zagadjenosti zagrebačkog zraka poslužili su aritmetički srednjaci mjerenja na sedam mjernih punktova. Ispitivanja su pokazala da, bez obzira na doba godine, strujanje zraka nad Zagrebom, odnosno u Zagrebu, reducira zagadjenost. Pri tome, uz danu brzinu vjetra, opća zagadjenost gradskog zraka može varirati, ali ne prelazi jednu određenu gornju granicu. Rezultate ispitivanja prikazuju grafikoni na sl. 3/21 i 3/22.



SI. 3/21 VEZA ZAGAĐENOSTI I BRZINE VJETRA
OPĆENITO U ZAGREBU



SI.3/22 VEZA ZAGAĐENOSTI I BRZINE VJETRA U STROGOM
CENTRU ZAGREBA

Krivulja "maksimalne koncentracije" na grafikonima označava gornju granicu, koju koncentracije SO_2 u Zagrebu ne prelaze - uz određene brzine vjetra. Uz male brzine vjetra koncentracije SO_2 mogu jako varirati (ovisno o emisiji SO_2 i meteorološkim parametrima). Porastom brzine vjetra smanjuje se interval mogućih zagađenosti gradskog zraka, tako da za veoma vjetrovitih dana, kada se brzine vjetra penju iznad 30 km/sat, srednja razina koncentracije SO_2 nad gradom praktički ne prelazi $200 \mu\text{gm}^{-3}$, a u strogom centru (vidi sl. 3/22) Zagreba ne prelazi $250 \mu\text{gm}^{-3}$.

Grafikoni su izradjeni za "srednju zagađenost" centra Zagreba, kao i za mjerno mjesto s najvećom zagađenošću, te ih se samo u tu svrhu može koristiti. Za svaki ostali, manje zagađeni mjerni punkt, trebali bi izraditi odgovarajući posebni grafikon. Međutim, usporedba krivulja maksimalne koncentracije na oba grafikona (crtkana linija na sl. 3/21 predstavlja krivulju maksimalne koncentracije sa sl. 3/22) sugerira slijedeću pretpostavku: ako se srednja brzina vjetra na Griču može smatrati reprezentativnom istovremeno za sve punktove mjerenja zagađenosti u centru Zagreba (što bi trebalo dokazati posebnim mjerenjima), onda se krivulja maksimalne koncentracije SO_2 za ostale punktove dobiva translacijom krivulje na sl. 3/22 (dakle za "najzagađeniji" punkt) u smislu padajućih vrijednosti $K(\text{SO}_2)$ i brzine vjetra. Veličina translacije određuje se pomoću usporedbe u zimskim, najzagađenijim mjesecima.

Općenito uzevši, priložene grafikone ima smisla koristiti upravo u hladnijem dijelu godine, kada se postižu najveće koncentracije SO_2 . U toplijem dijelu godine (IV do X mjesec) koncentracije SO_2 su nekoliko puta manje od zimskih. Slijedi da bi ljetna krivulja maksimalne zagađenosti zatvarala gotovo upola manje "područje zagađenog zraka" na grafikonu. Međutim, ona nije nanescena na grafikon, jer je nepouzdanost koristiti neku drugu krivulju osim one, koja daje gornju granicu najvećih koncentracija tokom čitave godine.

Prilikom upotrebe grafikona 3/21 i 3/22 ne smije se zaboraviti da u grafikone ulazimo sa srednjim dnevnim ili poludnevnim brzinama vjetra i koncentracijama SO_2 , a tokom dana može doći do znatnih odstupanja od ovih srednjaka. Zato i ovom prilikom treba naglasiti važnost mjerenja SO_2 svakog sata.

Rezultati istraživanja aeracije mogu se prikazati i u slijedećoj tabeli:

Tabela 3-5. Srednje dnevne koncentracije SO_2 , $\bar{K}(\text{SO}_2)$, prosječno u Zagrebu u ovisnosti o srednjoj dnevnoj brzini vjetra \bar{V} , izmjerenoj na Griču

m/sekundu	0-1.4	1.7-2.8	3.1-4.2	4.4-5.6	5.8-6.9	≥ 7.2
\bar{V} , km/sat	0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	> 26
$\bar{K}(\text{SO}_2)$, μgm^{-3}	0-1000	0-800	0-600	0-460	0-350	0-260

Iz sekularnog niza podataka na opservatoriju Zagreb-Grič (KL. PODACI, 1970) prikazat ćemo ovdje nekoliko podataka, koji ilustriraju klimatski prosječni režim brzine vjetra u Zagrebu.

Tabela 3-6. Srednji broj dana s jakim vjetrom (≥ 40 km/sat) Zagreb-Grič, 1931-1960.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
1.9	2.4	4.0	3.7	2.8	2.9	2.8	2.2	1.4	1.5	1.7	1.2	28.5

Prema grafikonu 3/21 vjetrovi jači od 40 km/sat toliko "čiste" gradski zrak, da koncentracije padaju ispod 100 μgm^{-3} . Nažalost, broj dana s takvim vjetrom veoma je malen (kao što pokazuje tabela 3-6), pogotovo u hladnijem dijelu godine, kada su koncentracije SO_2 najveće.

Potpuniju sliku o najčešćim brzinama u Zagrebu noću (u 0-1^h) i danju (12-13^h) daje slijedeća tabela (takodjer KL. PODACI, 1970).

Tabela 3-7. Razdioba vjetra (%) po srednjim brzinama u 0-1^h i 12-13^h - Zagreb-Grič, 1950-1965.

\bar{v} , m/sekundu km/sat	0-1.4	1.7-2.8	3.1-4.2	4.4-5.6	5.8-6.9	7.2	
	0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26	
Proljeće	0-1 ^h	42.7	35.8	13.5	5.8	1.4	0.8
	12-13 ^h	11.3	47.9	26.3	8.5	3.1	2.9
Ljeto	0-1 ^h	56.0	35.1	6.7	1.7	0.3	0.2
	12-13 ^h	12.4	59.8	10.7	6.0	1.7	0.4
Jesen	0-1 ^h	54.8	29.8	10.6	3.2	1.0	0.6
	12-13 ^h	29.9	46.6	14.6	5.4	2.1	1.4
Zima	0-1 ^h	58.4	25.0	9.7	4.6	1.5	0.8
	12-13 ^h	44.1	34.1	12.6	5.7	2.2	1.3

Podaci u ovoj tabeli prikazuju prosječnu sliku tzv. "prirodnog potencijala aeracije" Zagreba. Najčešće su brzine vjetrova tokom čitave godine između 0-10 km/sat, odnosno

vjetrovi slabiji od 3 m/sekundi (cifre ispisane kurziv-om). Kod toga su samo zimi najčešći, i noću i danju, najslabiji vjetrovi (0-5 km/sat). U svim ostalim godišnjim dobima maksimalna učestalost pomiče se od najslabijih vjetrova oko sredine noći, do vjetrova 6-10 km/sat u podne.

Ovi podaci, u usporedbi s podacima u tab. 3-5, pokazuju takvo aerzagadjivanje Zagreba, pri kome se koncentracije prizemnih zagadjjenja najčešće mogu popeti i do $800 \mu\text{gm}^{-3}$ (što je za $300 \mu\text{gm}^{-3}$ iznad maksimalno dozvoljene koncentracije).

Prirodne mogućnosti provjetravanja Zagreba nisu male. Medjutim, zagadjivanje gradskog zraka štetnim plinovima toliko je intenzivno tokom zimskih mjeseci, da bi vjetrovi zimi morali biti dva do tri puta jači od sadašnjih, kako bi današnje zimske koncentracije SO_2 (koje daleko premašuju svjetske standarde) smanjili na polovinu.

Obzirom da je nerealno očekivati tako jaku klimatsku fluktuaciju, koja bi izazvala toliko pojačanje strujanja zraka u Zagrebu, očito je da u zimskim mjesecima treba poduzimati efikasne mjere za smanjenje emisije zagadjjenja.

3.5.2

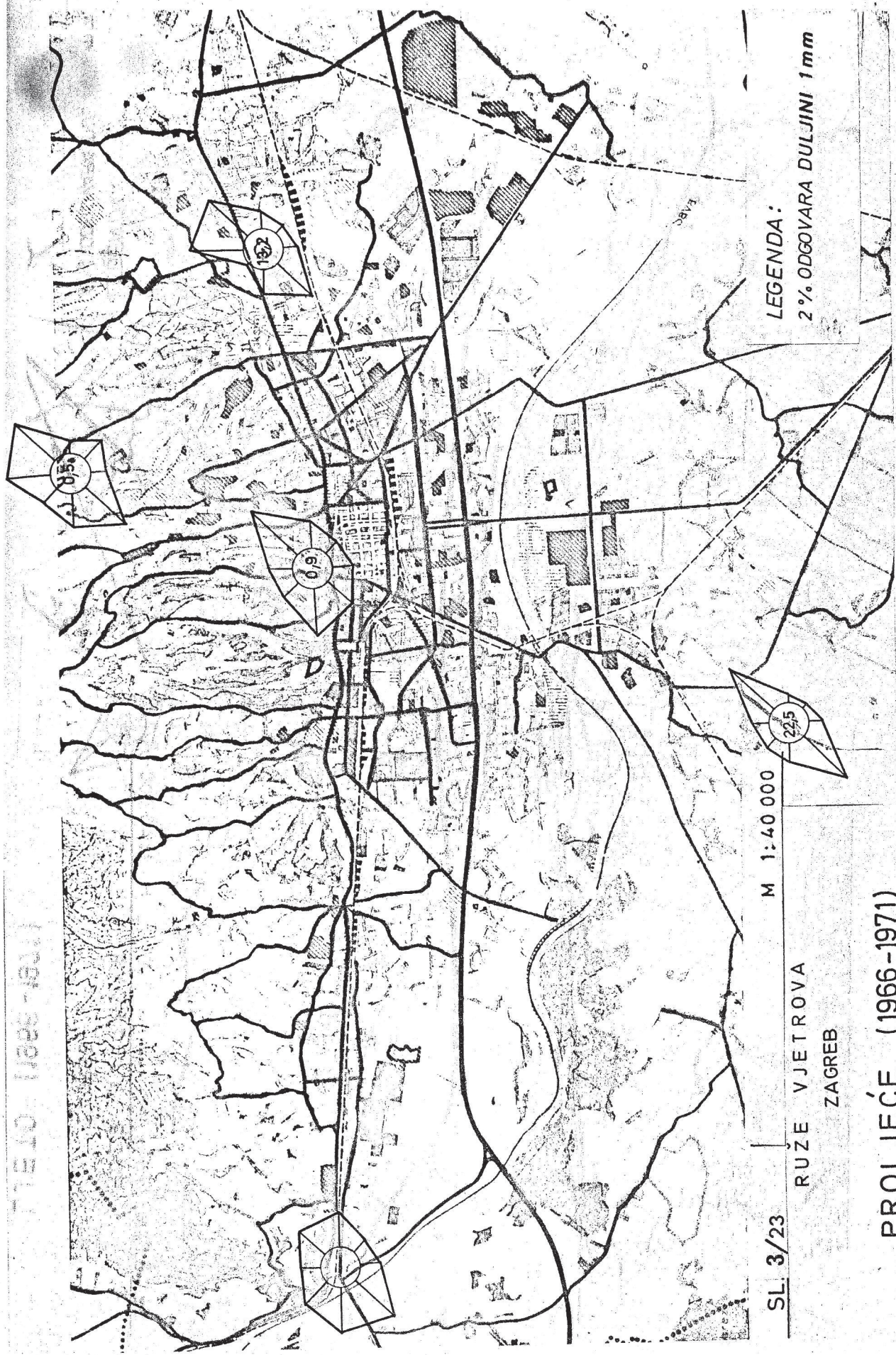
Ovisnost koncentracije SO_2 o smjeru vjetra

Uporedo s razvojem industrije na daljoj i bližoj periferiji gradova, postaje sve važnijim pitanje "što donosi pojedini smjer vjetra?". Naime, "provjetravanje" grada postoji bez obzira na smjer vjetra, ali unatoč tome može se očekivati da će - neovisno o brzini - pojedini smjerovi vjetra biti povezani s većim ili manjim zagadjjenjem gradskoga zraka.

Sezonske ruže vjetrova nad Zagrebom (sl. 3/23-3/26) vrlo se malo mijenjaju iz sezone u sezonu. To znači da tokom čitave godine, u klimatskom prosjeku, u Zagrebu prevladavaju slični smjerovi vjetra. Veliku ulogu o tome svakako ima i planina Medvednica, koja znatno modificira opću sliku strujanja nad Zagrebom. Ona se proteže od jugozapada prema sjeveroistoku, a većina ruža vjetra razvučena je upravo u tom smislu.

Tokom čitave godine najčešći je vjetar na području Zagreba iz smjera NE. Jedino meteorološka stanica u Podsusedu (smještena na krajnjem zapadnom rubu Medvednice) ima prevladavajuće vjetrove sa zapada (W). Nakon sjeveroistočnih, općenito su najčešći zapadni (W) i jugozapadni (SW) vjetrovi. Najrjedje pušu NW vjetrovi, a slično je i sa strujanjem iz SE i E smjera.

Ruže vjetra su izradjene na osnovi termina motrenja 07, 14 i 21 sat za razdoblje 1966-1971.



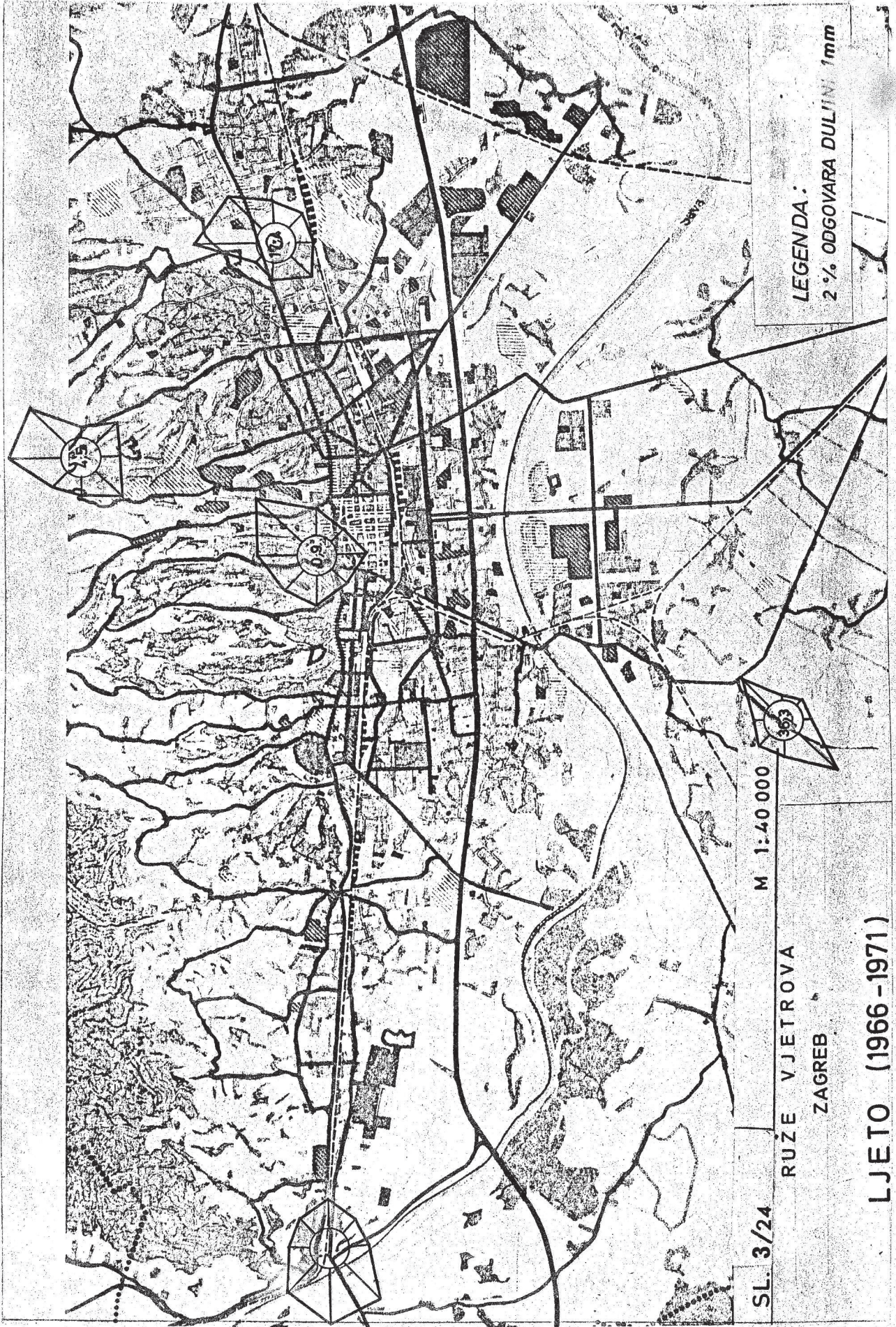
LEGENDA:
2% ODGOVARA DULJINI 1mm

M 1:40 000

RUZE VJETROVA
ZAGREB

PROLJEĆE (1966-1971)

111110 11222-15011



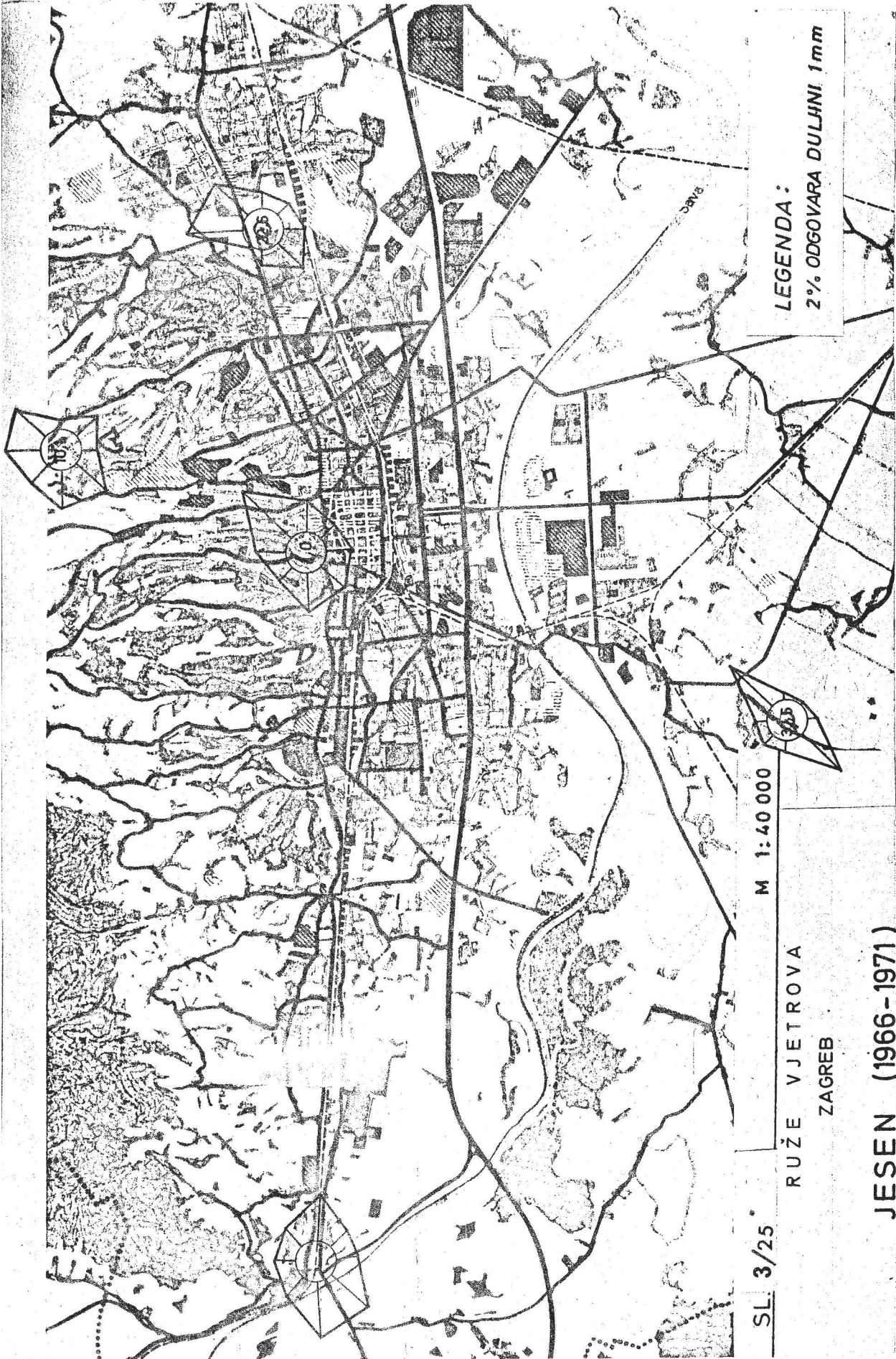
LEGENDA:
2% ODGOVARA DULJINI 1mm

M 1:40 000

SL. 3/24

RUZE VJETROVA
ZAGREB

LJETO (1966-1971)



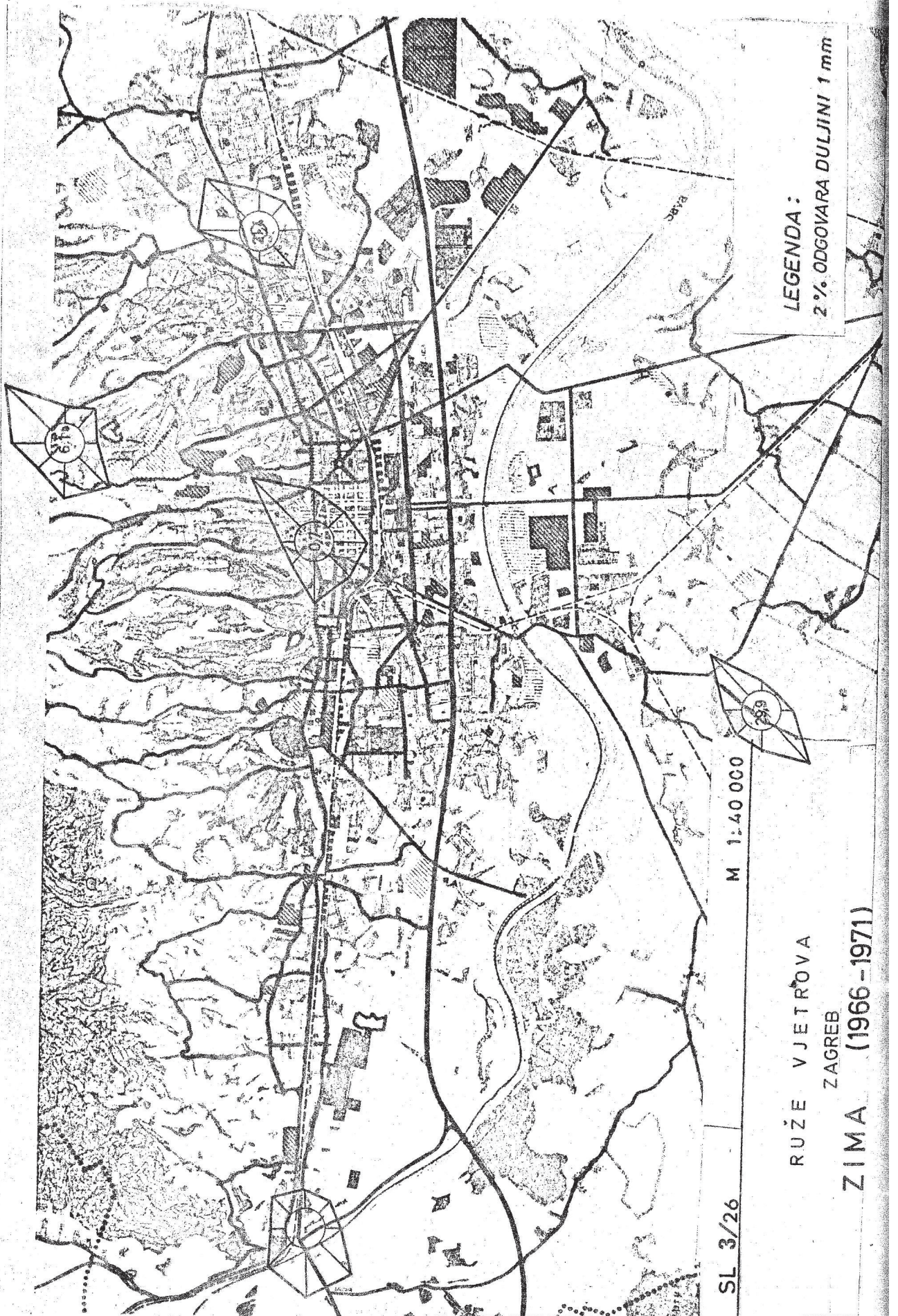
LEGENDA:
2% ODGOVARA DULJINI 1mm

M 1:40 000

RUŽE VJETROVA
ZAGREB

SL. 3/25

JESEN (1966-1971)



LEGENDA :
2% ODGOVARA DULJINI 1 mm

SL 3/26

M 1:40 000

RUŽE VJETROVA
ZAGREB
ZIMA (1966-1971)

Djelovanje pojedinih smjerova vjetra, a pogotovo najčešćih vjetrova, na zagađenost zraka u Zagrebu, proučeno je pomoću podataka satnih registracija brzine i smjera na opservatoriju Zagreb-Grič. Obzirom na varijacije smjera vjetra tokom dana, dakle od 13 do 13^h, pojavio se poseban problem kod pridruživanja smjera vjetra pojedinim K(SO₂).

Zato su za zimske mjesece (XII, I i II) u periodu 1966-1971. izdvojeni svi dani, odnosno svi slučajevi kada je tokom cijelog dana puha vjetar istog smjera. Dan je računat od 14 sati jednog do 13 sati slijedećeg dana.

U slučajeve permanentnog puhanja vjetra jednog smjera uračunati su i oni slučajevi, kada je takav vjetar puhao najmanje 20 (od 24 mogućih) sati, a dozvoljena su u pojedinim satima odstupanja $\pm 10^\circ$ od centralnog smjera. Ovo je ispitivanje radi svoje dugotrajnosti provedeno samo za zimske mjesece. Međutim, sličnost između sezonskih ruža vjetra za Zagreb indicira mogućnost primjene zimskih rezultata ispitivanja smjera vjetra i na ostala godišnja doba.

Broj slučajeva kada se smjer vjetra tokom dana nije mijenjao veoma je malen tokom zime. To je jedna od karakteristika zimskog režima strujanja zraka u Zagrebu. Ukupno je tokom XII, I i II mjeseca 1966, 1967, 1968, 1969, 1970 i 1971. bilo 100 takvih slučajeva, što čini samo 18% svih zimskih dana.

Ti su slučajevi raspodijeljeni na pojedine smjerove prema slijedećoj tabeli

smjer	NE	S	SW	W	Tišina + vrlo slabi vjetar
zimski učestalost 1966-1971.	52	10	4	18	16

Napomena: slučajevima vrlo slabog vjetra smatraju se svi oni kada je suma satnih brzina tokom 24 sata (od 14^h do 13^h) bila ≤ 18.0 mps.

Ovi se podaci podudaraju s oblikom ruža vjetra na Griču, te im čine nadopunu, u smislu da su NE i W ne samo najčešći vjetrovi, nego je kod njih i najveća vjerojatnost da će puhati tokom cijelog dana. Uzorcima tih smjerova vjetra (SW je priključen W-uzorku) pridružene su istovremene dnevne koncentracije SO₂ (uzete kao srednja razina SO₂ nad centrom), a ujedno je izračunata i njihova srednja brzina. Rezultati su slijedeći:

smjer	NE	S	W(+SW)	Tišina + vrlo slabi vjetar
$\bar{V}_{\text{Grič}}$ m/sek	3.1	1.2	3.2	634
K(SO ₂) μgm^{-3}	261	271	439	

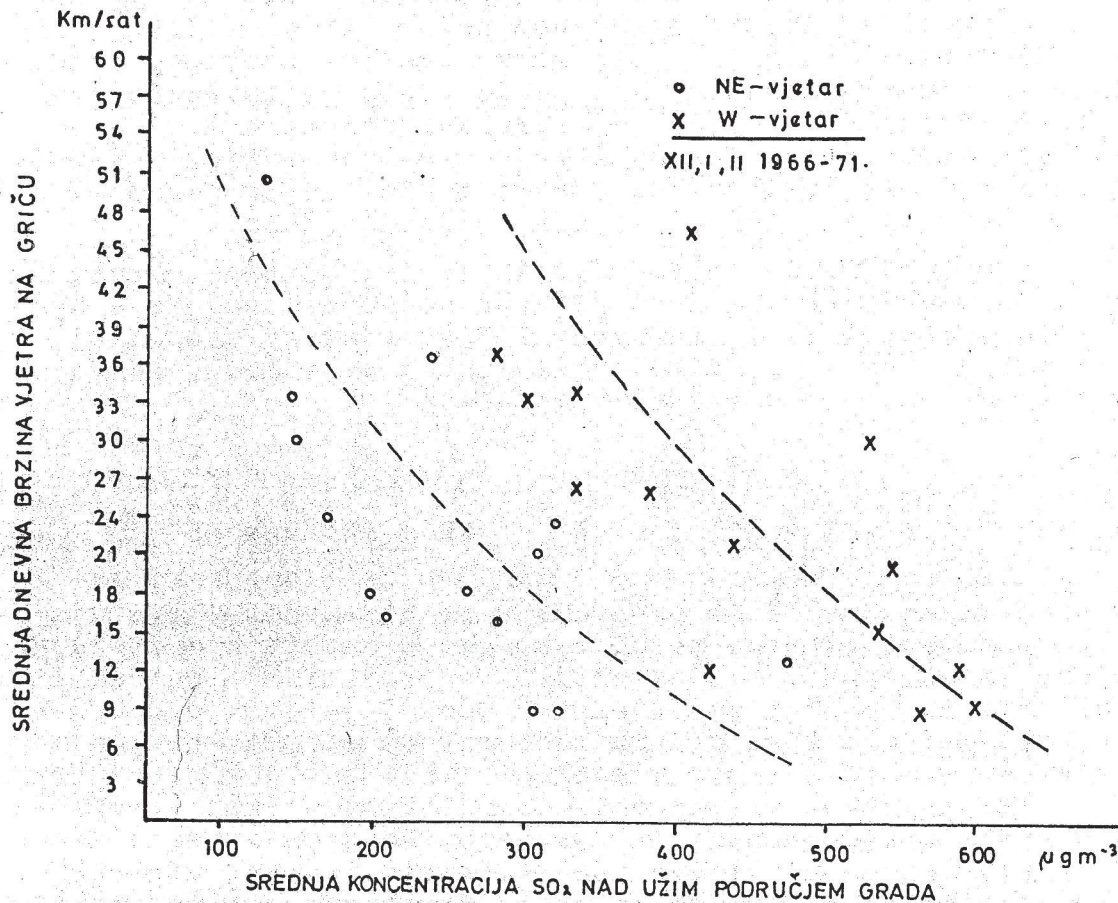
Najmanja srednja koncentracija SO₂ nad centrom grada javlja se uz puhanje NE-vjetrova. Vjetar iz tog smjera najpogodniji je za aeraciju centra grada zimi, a veoma je pogodno i to što je upravo NE-smjer i najčešći. Zrak je najzagadjeniji uz tišine ili vrlo slabe vjetrove, a dosta velike (skoro dva puta veće nego kod NE vjetrova) koncentracije SO₂ javljaju se uz puhanje W i SW vjetrova, premda su oni u prosjeku jednako jaki kao i NE. Zagadjenost zraka uz južne vjetrove nije velika, ali je ipak nešto veća od zagadjenosti uz NE-smjer, jer su S-vjetrovi u prosjeku osjetno slabiji (srednja brzina 1.2 m/sek).

Osjetno povećanje koncentracije SO₂ uz puhanje W-vjetrova može se objasniti postojećim stanjem rasporeda industrijskih objekata prema "Generalnom urbanističkom planu grada Zagreba". Naime, premda je najveći dio industrijskih objekata na SE periferiji Zagreba (što je dosta pogodno jer su jugoistočni vjetrovi najrjedji), dosta velika površina s industrijom nalazi se i u zapadnoj periferiji, odakle W-vjetrovi nose otpadne plinove i krute čestice prema užem centru grada.

U ovom se istraživanju normalno nametnulo pitanje hoće li W-vjetrovi, porastom brzine, "provjetravati" grad, ili će ga još jače zagadljivati. Odgovor na to daje se na slici 3/27.

Grafikon ilustrira aeraciju Zagreba (užeg centra) za vrijeme NE i W - vjetrova. Kao što se vidi, porastom jačine i W-vjetrovi provjetravaju, odnosno "čiste" gradski zrak, ali dva puta slabije od NE vjetrova. Općenito se može ponoviti, da su permanentni (tokom dana) zapadni vjetrovi jači i povezani s većim koncentracijama SO₂ nego sjeveroistočni.

Zakovitosti provjetravanja grada, koje vrijede općenito, donekle se mijenjaju ako se u obzir uzmu i smjerovi. Naime, ovdje ne dobivamo "krivulju maksimalne koncentracije" koja zatvara "područje zagadjenog zraka", već određenoj brzini vjetrova danog smjera pripada najvjerojatnija zagadjenost (prema crtanim linijama na grafikonu) s mogućim odstupanjima približno $< \pm 150 \mu\text{gm}^{-3}$ (zbog malih uzoraka krivulje nisu računane, već su izvučene približno - od oka).



SI.3/27 KORELACIJA KONCENTRACIJE SO_2 I BRZINE VJETRA
 KOD NE I W-VJETROVA

3.5.3 Prijenos čestica nad gradom

Nošene vjetrom uz slabije ili jače turbulentno miješanje, otpadne čestice i plinovite mase putuju nad područjem grada, mijenjajući pritom smjer, brzinu i koncentraciju. To neprekidno komešanje jače je kod nemirnog, vjetrovitog vremena, a slabije pri mirnom, tihom vremenu, rezultirajući jednom konstantno varijabilnom raspodjelom otpadnih materija u gradu. U cjelini, prijenos i konačna slika zagađenosti u gradu mijenjaju se tokom godine i tokom dana. Dosadašnja su ispitivanja u svijetu pokazala, da najveće koncentracije otpadnih materija u gradu nalazimo u *savjetrini* zgrada, obzirom na

prevladavajuće strujanje. Međutim, režim strujanja zraka nad našim gradom toliko je varijabilan da je, u smislu prijenosa čestica vjetrom, teško definirati "prevladavajuće" strujanje. Međutim, režim strujanja zraka nad našim gradom toliko je varijabilan da je, u smislu prijenosa čestica vjetrom, teško definirati "pravladavajuće" strujanje. Zato je potrebno sve rezultate ispitivanja aeracije Zagreba kompletirati u jednu integralnu sliku rezultantnog strujnog polja, a time i rezultantnog prijenosa čestica nad gradom tokom duljeg perioda vremena (npr. mjesec dana ili jedno godišnje doba).

Postoje metode pomoću kojih se iz podataka o ruži vjetra, odnosno o učestalosti puhanja pojedinih smjerova vjetra, može odrediti tzv. rezultantni "put vjetra". Jedna od takvih metoda, (CONRAD, 1950) korištena u ovom radu, određuje put vjetra pomoću slijedećih izraza:

$$\begin{aligned} P_N &= N - S + (NW + NE) \cos 45^\circ - (SW + SE) \cos 45^\circ \\ P_E &= E - W + (NE + SE) \cos 45^\circ - (NW + SW) \cos 45^\circ \end{aligned} \quad (3.1)$$

P_N i P_E u formulama (3.1) označavaju rezultantne putove vjetra, odnosno rezultantne konačne pomake u smjeru sjever-jug i u smjeru istok-zapad. Medjusmjerovi se projiciraju na četiri glavna smjera. Konačni put vjetra P određuje se kao vektorski zbroj P_N i P_E . "Put vjetra" je zapravo umnožak trajanja puhanja danog smjera (npr. u satima) i srednje jačine vjetra (npr. u km/sat) kroz razmatrani period. U pomanjkanju podataka o ukupnom trajanju puhanja vjetra određenog smjera, u ovom je radu pretpostavljeno, da je čestina vjetra upravno proporcionalna njegovom trajanju, te da se srednje sezonsko trajanje vjetra određenog smjera (na osnovi tri termina motrenja) može aproksimirati njegovom srednjom sezonskom učestalosti. Nadalje, podaci onih stanice koje mjere i jačinu vjetra (Grič i Maksimir) pokazuju, da se jačine vjetra u tromjesečnom (sezonskom) višegodišnjem prosjeku već toliko izglađuju, da ne pokazuju znatnije razlike između jačina pojedinih smjerova i pojedinih godišnjih doba. To ukazuje na mogućnost da se formule (3.1) primijene u svom najjednostavnijem obliku, tj. samo na učestalost vjetra, što je i učinjeno u ovom radu. Prema tome, za opću ocjenu strujnog polja nad Zagrebom po godišnjim dobima korištene su samo učestalosti osam glavnih smjerova vjetra, na sezonskim ružama vjetra.

Brojevi u tabeli 3-8 daju procentualne učestalosti (ili vjerojatnosti) puta, odnosno pomaka čestice zraka u smjeru N-S i E-W, koji je rezultat puhanja vjetrova raznih smjerova tokom pojedinog godišnjeg doba, na pojedinoj meteorološkoj stanici. Veća brojka u stupcu P pokazuje da je veća vjerojatnost konačnog, rezultantnog pomaka u smjeru P , a smjer puta vjetra P određuju njegove komponente P_N i P_E . Pritom, pozitivne vrijednosti P_N i P_E označavaju pomake od sjevera prema jugu, odnosno od istoka prema zapadu, dok negativan P_N označava pomak od juga prema sjeveru, a negativan P_E pomak prema istoku.

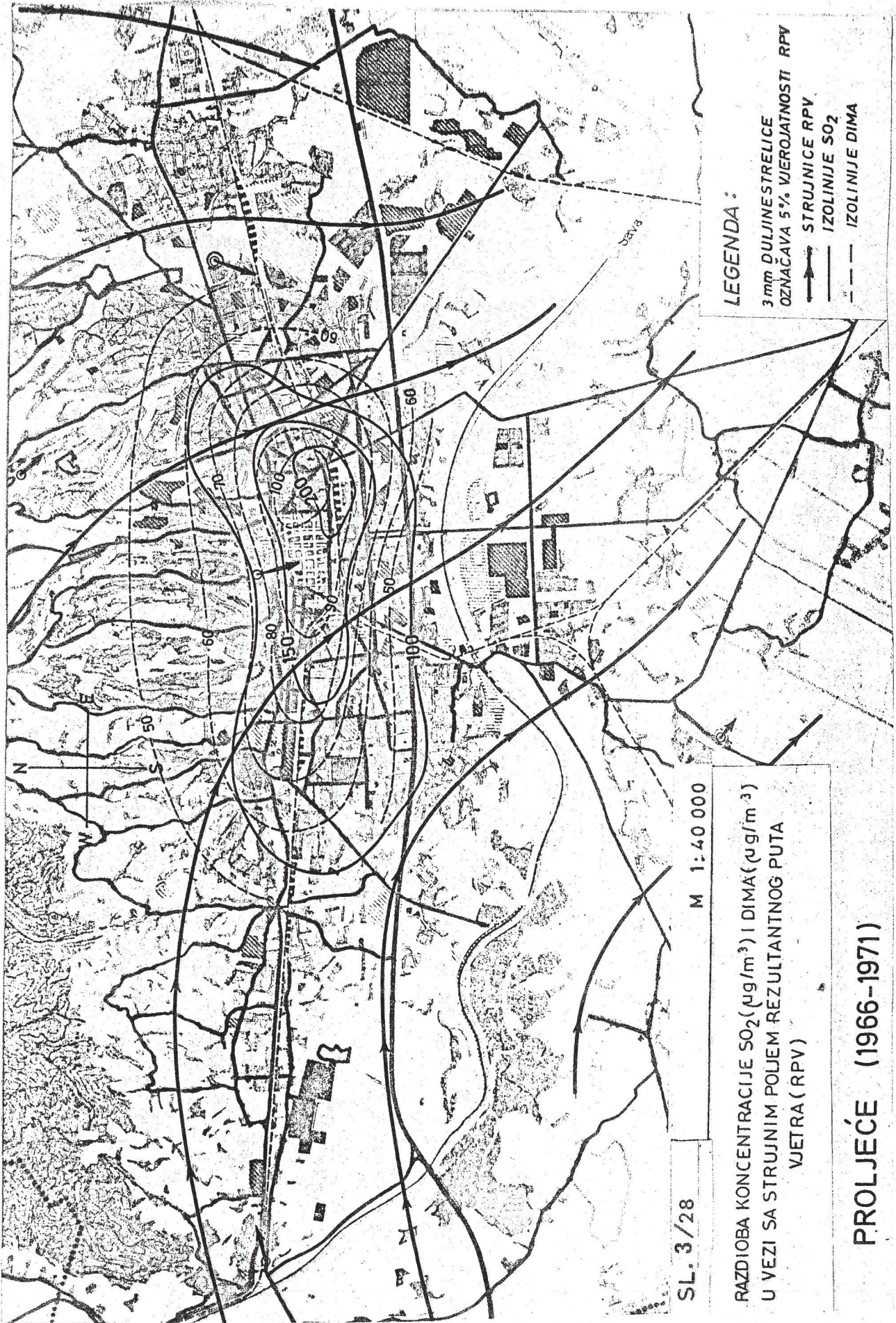
Tabela 3-8. Komponente (P_N i P_E) i put vjetra P po sezonama (1966-1971.), %

Proljeće			Ljeto			Jesen			Zima		
P_N	P_E	P	P_N	P_E	P	P_N	P_E	P	P_N	P_E	P
Zagreb-Maksimiri											
14.7	2.7	14	18.2	9.5	20	29.0	6.9	30	10.1	14.7	18
Zagreb-Grič											
13.3	-0.1	13	20.0	8.7	22	31.2	6.8	32	4.2	7.9	9
Zagreb-Rim											
7.8	-7.1	10	13.3	3.0	14	7.6	-8.5	10	11.2	1.2	11
Zagreb-Podsused											
-1.4	-11.9	12	-2.0	-22.3	22	-6.8	-11.5	15	-0.5	-7.7	8
Botinec											
5.0	-6.4	8	0.3	-11.0	11	-1.0	-4.4	5	8.7	-3.8	10

Putovi vjetra P , izračunati za nekoliko mjesta jednog područja, nanose se na kartu u obliku vektora, čiji smjer pokazuje smjer rezultantnog pomaka, dok duljina u našem slučaju ne prikazuje veličinu konačnog pomaka, nego njegovu vjerojatnost. Preko takve karte mogu se povući linije koje tangiraju vektore puta vjetra, te daju kontinuiranu sliku rezultantnog strujnog polja nad čitavim područjem. Mi ih ovdje nazivamo "strujnicama rezultantnog puta vjetra (RPV)", premda one nisu identične pravim strujnicama, kod kojih je u obradu ušla i brzina strujanja.

Putovi vjetra, dobiveni iz podataka tabele 3-8, prikazani su na slikama 3/28 do 3/31 zajedno sa strujnicama RPV.

Rezultantni strujni režim iznad Zagreba tokom čitave godine dirigira prijenos čestica od sjevera prema jugu, s najvećom vjerojatnošću ljeti i u jesen. To je interesantna činjenica, jer pokazuje koliko je velik upliv Medvednice na opće strujanje zraka preko Zagreba. Naime, opća je cirkulacija, u sezonskom prosjeku, u smjeru od zapada prema istoku, a pod uplivom Medvednice na nju se nad našim gradom superponira, čak i u klimatološkom, sezonskom prosjeku, cirkulacioni sistem, u kome u nižim slojevima prevladava prijenos zraka niz Medvednicu prema jugu. Vrlo je vjerojatno da je taj cirkulacioni sistem zatvoren u višim slojevima zraka, prijenosom čestica od juga prema Medvednici. Ovaj teoretski zaključak, izveden na osnovi jednadžbe kontinuiteta, trebalo bi potvrditi specijalnim aeorološkim ispitivanjima.



LEGENDA:

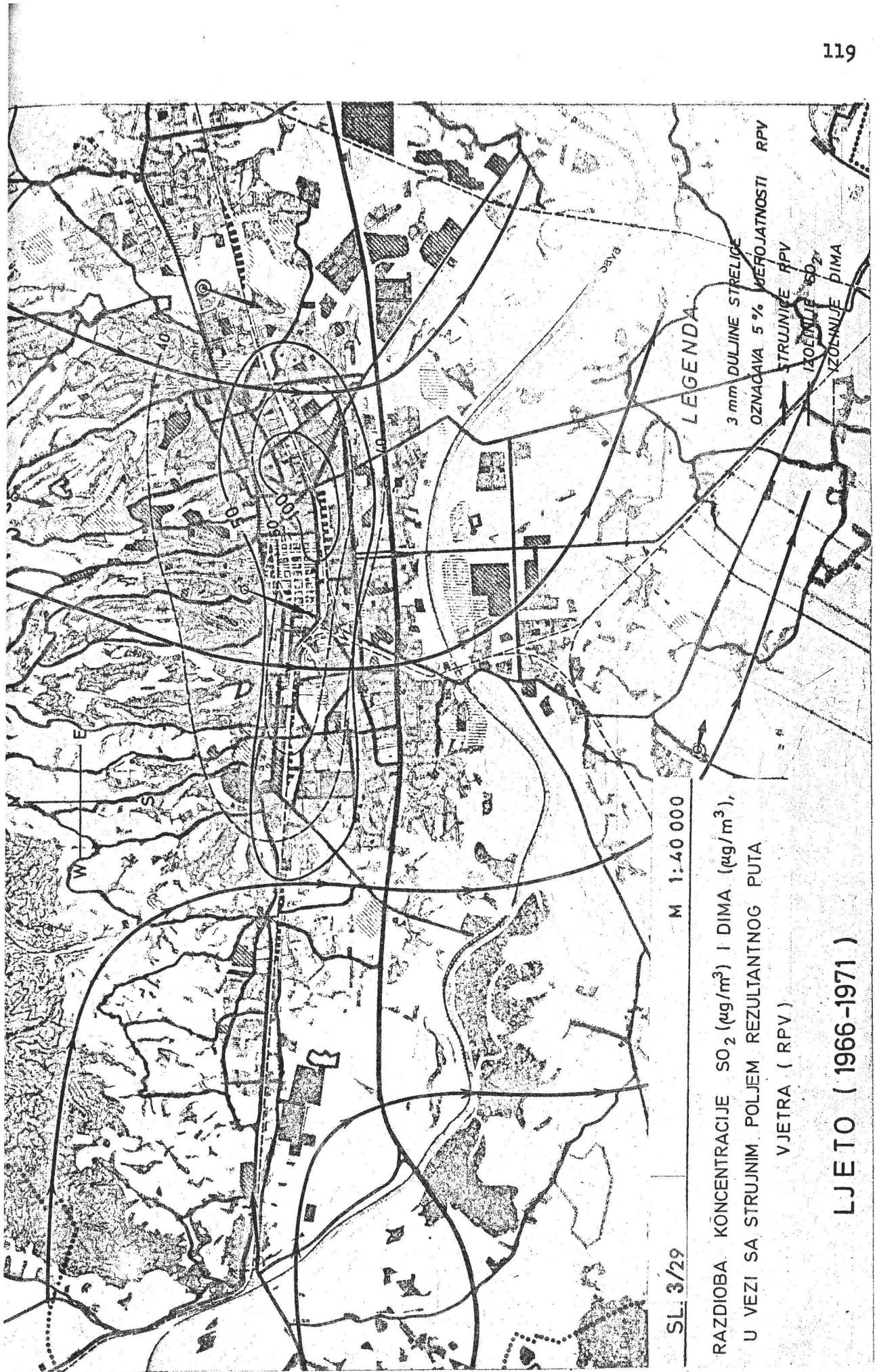
- 3 mm DULJINE STRELICE
OZNAČAVA 5% VJEROJATNOSTI RPV
- > STRUJNICE RPV
- IZOLINIJE SO₂
- IZOLINIJE DIMA

SL. 3/28

M 1:40 000

RAZDIJELA KONCENTRACIJE SO₂ (µg/m³) I DIMA (µg/m³)
 U VEZI SA STRUJNIM POLEM REZULTANTNOG PUTA
 VJETRA (RPV)

PROLJEĆE (1966-1971)



SL. 3/29

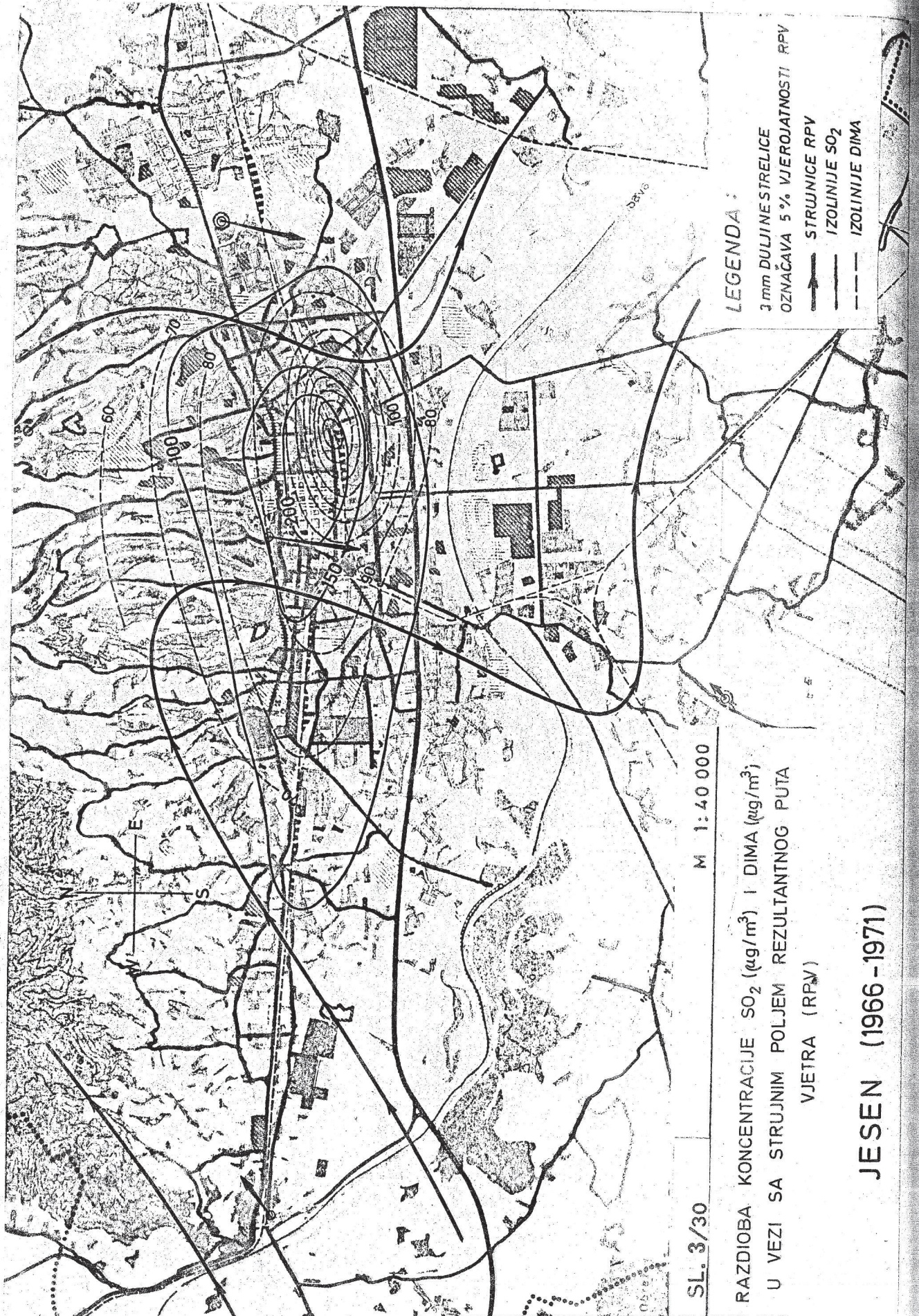
M 1:40 000

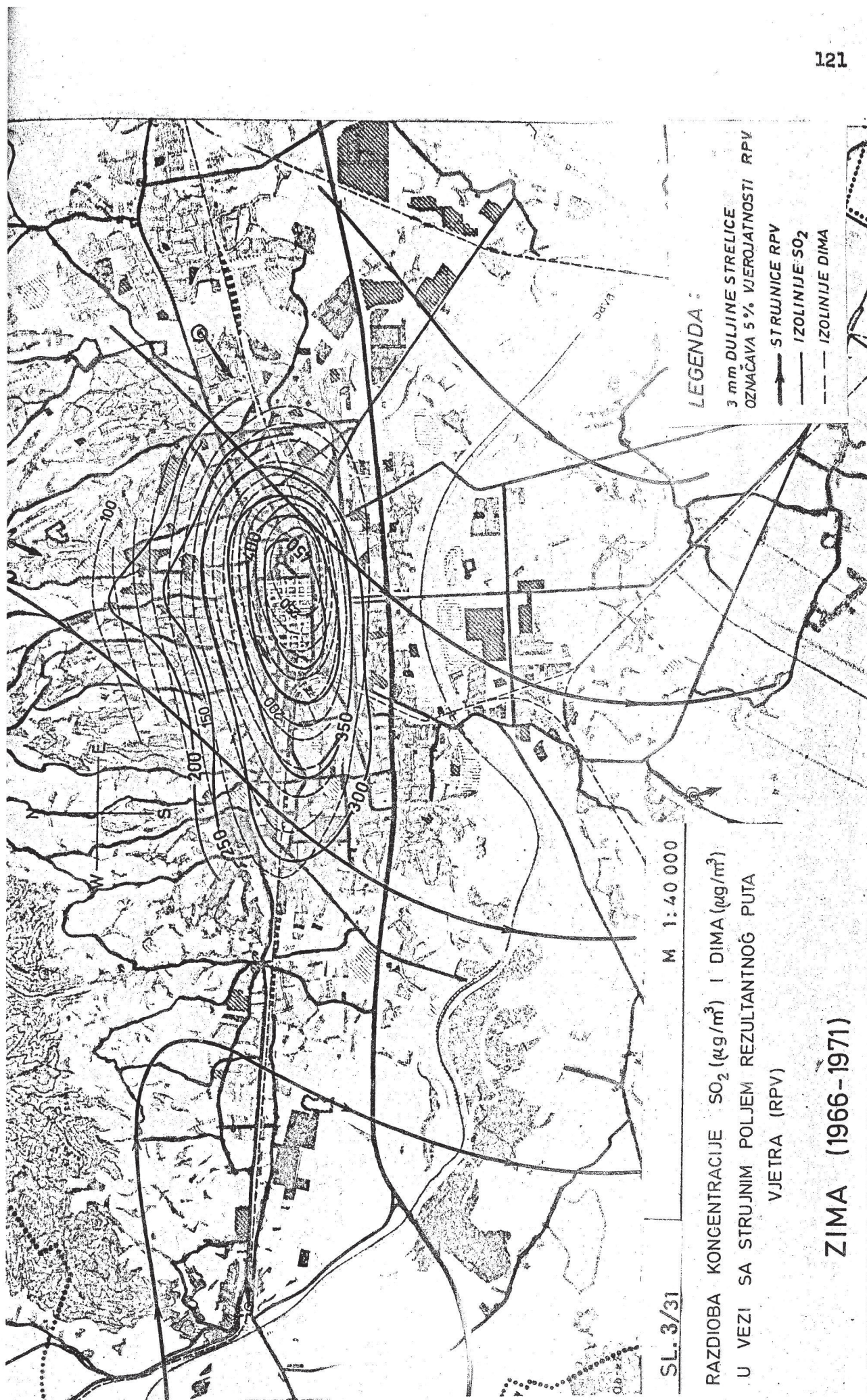
RAZDILOBA KONCENTRACIJE SO₂ (µg/m³) I DIMA (µg/m³),
 U VEZI SA STRUJNIM POLJEM REZULTANTNOG PUTA
 VJETRA (RPV)

LEGENDA

- 3 mm DULJINE STRELICE
- OZNACAVA 5% VEROJATNOSTI RPV
- STRUJNICE RPV
- IZOENIJE SO₂
- IZOENIJE DIMA

LJETO (1966-1971)





Na slikama su ucrtane i izolinije srednjih dnevnih koncentracija SO_2 i dima po sezonama. Kao što se vidi, njihov je oblik vezan uz konture grada i uglavnom se ne mijenja iz sezone u sezonu. To, međutim, ne znači da prostorna razdioba SO_2 i dima ne ovisi o strujanju nad gradom, već je ona, naprotiv, upravo u skladu s veoma malim promjenama u smjeru RPV iz sezone u sezonu, kao i s malim vjerojatnostima RPV u sezonskim prosjecima. Jedino su u jesen, kada procentualna učestalost RPV na području Griča i Maksimira poprima vrijednosti od 30%, izolinije SO_2 i dima malo više razvučene u smjeru sjever-jug.

3.5.4 "Box-model" Zagreba

Zbog akutnosti problema prostorno-vremenske varijabilnosti zagađenja zraka, danas u svijetu postoji niz eksperimentalnih i teoretskih modela gradova, pomoću kojih se pronalaze praktična rješenja za svaki pojedini grad. U našem ćemo slučaju primijeniti jedan od najpoznatijih teoretskih modela, tzv. "box-model" (model kutije - *DISPERSION AND FORECASTING OF AIR POLLUTION*, 1972 - str. 34). U svom najjednostavnijem obliku on glasi

$$f = \frac{\bar{U}}{\Delta} \quad (3.2)$$

gdje je \bar{U} srednja brzina strujanja zraka nad gradom, a Δ dijаметar grada duž vektora vjetra \bar{U} . Ovdje f predstavlja učestalost kojom će u jedinici vremena (npr. u jednom satu) vjetar brzine \bar{U} potpuno "pročistiti" zrak u "kutiji", odnosno "gradu" dijametara Δ , (naime, potpuno promijeniti sadržaj zraka u gradu). Što je veći f to je manja opasnost od dugotrajnih opasnih koncentracija zagađenja u gradu. Srednja brzina određenog smjera vjetra \bar{U} nad gradom neće se mijenjati (osim u slučaju značajnije klimatske fluktuacije). Slijedi da će f opadati porastom grada, zbog čega je veoma važno širiti grad u onom smjeru, u kome će prirodni režim aeracije najviše biti iskorišten.

Dosadašnja ispitivanja aeracije Zagreba pokazala su, da strujanje zraka, brže od 15 kmh^{-1} , odnosno 3 ms^{-1} , provjetrava zagrebački zrak u tolikoj mjeri, da smanjuje koncentracije SO_2 na manje od $0.5 \mu\text{gm}^{-3}$. Najčešći vjetar u Zagrebu je NE sa srednjom brzinom $U_{\text{NE}} = 3.1 \text{ ms}^{-1}$. Uz njega je zabilježena srednja koncentracija $\text{SO}_2 = 260 \mu\text{gm}^{-3}$. Iza njega slijede po učestalosti W i SW vjetrovi sa sličnom srednjom brzinom ($U_{\text{W-SW}} = 3.2 \text{ ms}^{-1}$), ali su uz njih povezane dvostruko veće koncentracije zagađenja u Zagrebu kao cjelini. Ako na ovo prevladavajuće strujanje u Zagrebu primijenimo teoriju "box-modela", dobivamo

a) za sjeverne do sjeveroistočne vjetrove

$$f_{N-NE} = \frac{3}{10000} \quad (\Delta \text{ Zagreba u smjeru N-S} \\ \text{je približno 10 km})$$

$$f = 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} = 1.1 \text{ sat}^{-1}$$

Znači, prema teoretskom pokazatelju f , vjetrovi sa sjevera i sjeveroistoka "pročišćavaju" zagrebački zrak frekvencijom od "jedanput" na sat.

b) za zapadne i jugozapadne vjetrove

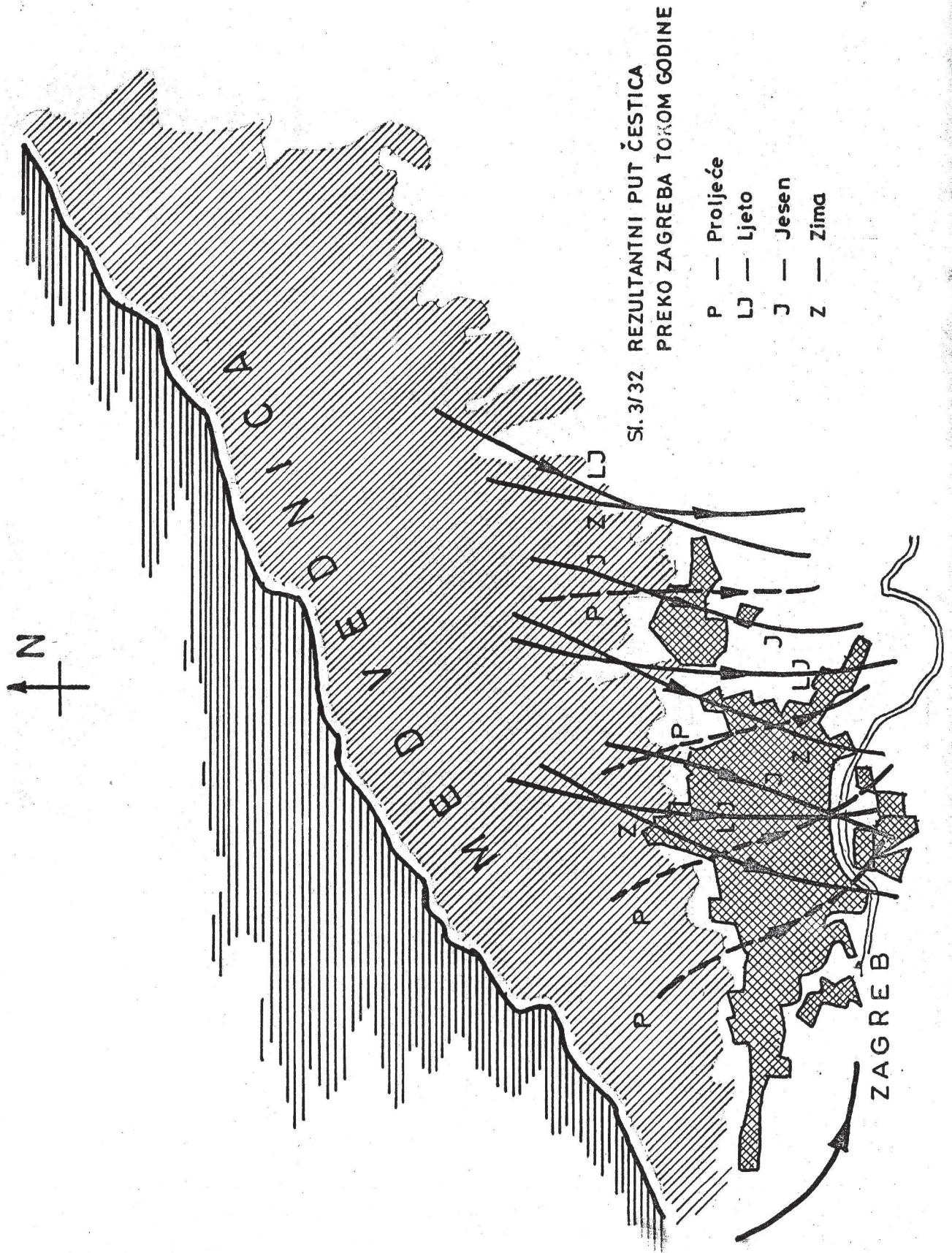
$$f_{W-SW} = \frac{3}{20000} \quad (\Delta \text{ Zagreba u smjeru W-E} \\ \text{je približno 20 km})$$

$$f = \frac{3}{2} 10^{-4} \text{ s}^{-1} = 0.54 \text{ sat}^{-1}$$

Dakle, zbog protegnutosti Zagreba u smjeru zapad-istok, "pročišćavanje" grada je dva puta slabije.

Slijedi jednostavan zaključak: *grad treba širiti u onom smjeru, na koji je prevladavajuće strujanje okomito.* Ilustracije radi, ucrtane su na slici 3/32 strujnice rezultantnog puta čestica zraka preko Zagreba tokom godine.

Ovakvo rezultatno strujanje iznad Zagreba u velikoj je mjeri modifikacija makrostrujanja uslijed postojanja planine Medvednice. Zato je logično pretpostaviti, da strujnice RPV imaju isti smjer kao na slici, i dalje prema istoku u podnožju Medvednice. Odavde slijedi konačni zaključak: *Zagreb bi trebalo širiti prema istoku, duž padina Medvednice, pri čemu bi prirodni režim aeracije bio maksimalno iskorišten.* Dodatnim ispitivanjima pokazalo se, doduše, da se upliv Medvednice osjeća čak i do Velike Gorice, međutim on je tu već beznačajno slab (POJE, 1972). Potrebna su specijalna aerološka mjerenja koja bi odredila udaljenost prema jugu, do koje katabatički vjetrovi s Medvednice još "čiste" grad.



Sl. 3/32. REZULTANTNI PUT ČESTICA
PREKO ZAGREBA TOKOM GODINE