

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE  
VIDES UN BŪVZINĀTŅU FAKULTĀTE

LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE  
FACULTY OF ENVIRONMENT AND CIVIL ENGINEERING

**Viesturs Kalniņš**

**Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējums ar  
bioindikācijas un vides parametru metodēm**

**Promocijas darba  
KOPSAVILKUMS**

inženierzinātņu doktora (*Dr.sc.ing.*) doktora zinātniskā grāda iegūšanai  
Vides zinātnes nozarē Vides inženierzinātnes apakšnozarē

**Evaluation of Air Pollution Cumulative Effect by the  
Use of Environment Parameter and Bioindication  
Methods**

**SUMMARY**

of the Thesis for Doctoral Degree in Engineering Sciences (*Dr.sc.ing.*),  
Environmental Engineering Subbranch

**Viesturs Kalniņš** \_\_\_\_\_

**Jelgava  
2016**

## INFORMĀCIJA

**Promocijas darbs izstrādāts:** Latvijas Lauksaimniecības universitātes Vides un būvzinātņu fakultātes Vides un ūdenssaimniecības katedrā laika posmā no 2011. līdz 2016. gadam.

**Promocijas darba zinātniskie vadītāji:**

Dr.sc.ing. Rītvards Sudārs, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors  
Dr.silv. Inga Straupe, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesore

**Oficiālie recenzenti:**

Dr. Vitas Marozas, Aleksandras Stulginskis universitātes profesors, Lietuva  
Dr.habil.sc.ing. Dagnija Blumberga, Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta profesore  
Dr.sc.ing. Jūlija Gušča, Rīgas Tehniskās universitātes Vides aizsardzības un siltuma sistēmu institūta asoc.profesore

**Promocijas padomes sastāvs:**

Prof., Dr.sc.ing. Rītvards Sudārs, padomes priekšsēdētājs  
Asoc.prof., Dr.sc.ing. Ainis Lagzdīņš, padomes priekšsēdētāja vietnieks  
Prof., Dr.sc.ing. Viesturs Jansons  
Prof., Dr.habil.sc.ing. Dagnija Blumberga  
Prof., Dr.habil.sc.ing. Ivars Veidenbergs  
Prof., Dr.habil.biol. Imants Liepa  
Prof. Dr.silv. Inga Straupe  
Vad. pētniece, Dr.geogr. Ilga Kokorīte

**Promocijas darba aizstāvēšana notiks** LLU Vides zinātnes nozares, Vides inženierzinātnes apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2016.gada 30. augustā plkst. 13:00 Jelgavā, Akadēmijas ielā 19, Vides un būvzinātņu fakultātes 117. auditorijā

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā ielā 2 un tiešsaistē <http://llufb.llu.lv/>

Atsauksmes sūtīt Promocijas padomes sekretārei, LLU Vides un būvzinātņu fakultātes docentei Dr.sc.ing. Laimai Bērziņai (Akadēmijas iela 19, LV-3001, Jelgava, Latvija, e-pasts: [laima.berzina@llu.lv](mailto:laima.berzina@llu.lv))

## INFORMATION

**The research was carried out** at the Department of Environmental Engineering and Water Management, Faculty of Environment and Civil Engineering, Latvia University of Agriculture from 2011. to 2016.

### **Scientific supervisor:**

Dr.sc.ing. Ritvars Sudārs, Professor of Latvia University of Agriculture

Dr.silv. Inga Straupe, Professor of Latvia University of Agriculture

### **Official reviewers:**

Dr. Vitas Marozas, Professor of Aleksandras Stulginskis University, Lithuania

Dr.habil.sc.ing. Dagnija Blumberga, Professor of Riga Technical University, Institute of Energy Systems and Environment

Dr.sc.ing. Jūlija Gušča, asoc. Professor of Riga Technical University, Institute of Energy Systems and Environment

### **Promotion Board:**

Prof., Dr.sc.ing. Ritvars Sudārs, chairman

Asoc.prof., Dr.sc.ing. Ainis Lagzdīnš, vice-chairman

Prof., Dr.sc.ing. Viesturs Jansons

Prof., Dr.habil.sc.ing. Dagnija Blumberga

Prof., Dr.habil.sc.ing. Ivars Veidenbergs

Prof., Dr.habil.biol. Imants Liepa

Prof. Dr.silv. Inga Straupe

Leading Researcher, Dr.geogr. Ilga Kokorīte

**The thesis will be defended** at a public session of the Promotion Board (Environmental Science branch, Environmental Engineering subbranch) to be held at the Faculty of Environment and Civil Engineering on August 30th, 2016, at 13:00. Venue – 19 Akadēmijas Street, Jelgava, lecture room 117.

The thesis and the summary of thesis are available at the Fundamental Library of Latvia University of Agriculture, 2 Liela Street Jelgava and online:

<http://lufb.llu.lv/>

References should be addressed to the secretary of the Promotion Board, assistant professor of the Faculty of Environment and Civil Engineering of the Latvia University of Agriculture Dr.sc.ing. Laima Bērziņa (19 Akadēmijas Street, LV-3001, Jelgava, Latvia, e-mail: [laima.berzina@llu.lv](mailto:laima.berzina@llu.lv))

## SATURA RĀDĪTĀJS / CONTENT

1. TĒMAS AKTUALITĀTE .....	6
1.1. Promocijas darba mērķis un uzdevumi .....	7
1.2. Promocijas darba struktūra.....	7
1.3. Pētījuma zinātniskā novitāte un praktiskā nozīmība .....	8
1.4. Promocijas darba rezultātu aprobācija .....	8
2. MATERIĀLS UN METODEDES .....	10
2.1. Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšana, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas Liepājā un Rīgā .....	10
2.1.1. Sinerģiskā efekta novērtēšanas process .....	10
2.1.2. Kamerālo darbu metodika .....	12
2.2. Sinerģiskā efekta novērtējums satiksmes radītajam gaisa piesārņojumam Liepājā, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu.....	12
2.3. Darbā izmantotās statistiskās analīzes metodes .....	15
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA .....	16
3.1. Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšana, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas Liepājā un Rīgā .....	16
3.1.1. Sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļa izstrāde .....	16
3.1.2. Sinerģiskā efekta novērtējuma rezultāti .....	18
3.2. Sinerģiskā efekta novērtējums satiksmes radītajam gaisa piesārņojumam Liepājā, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu.....	22
3.2.1. Sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļa izstrāde .....	22
3.2.2. Sinerģiskā efekta novērtējuma rezultāti .....	24
3.3. Liepājā un Rīgā veikto sinerģiskā efekta novērtējumu rezultātu validācija .....	28
3.4. Izstrādāto sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļu pielietošanas metodika .....	31
4. SECINĀJUMI .....	33

1. BACKGROUND OF THE RESEARCH.....	34
1.1. Goal and tasks of the thesis.....	35
1.2. Structure of the thesis .....	35
1.3. Scientific novelty and practical value of the research.....	36
1.4. Approbation of the results.....	36
2. MATERIALS AND METHODS .....	38
2.1. Air pollution cumulative effect evaluation with automated measurement stations in Liepaja and Riga.....	38
2.1.1. Cumulative effect evaluation process.....	38
2.1.2. Methodology of data processing.....	39
2.2. Air pollution cumulative effect evaluation in Liepaja with, pollution dispersion modelling .....	39
2.3. Used statistical analysis methods .....	40
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	41
3.1. Air pollution cumulative effect evaluation with automated measurement stations in Liepaja and Riga.....	41
3.1.1. Development of cumulative effect evaluation model.....	41
3.1.2. Results of cumulative effect evaluation.....	41
3.2. Air pollution cumulative effect evaluation in Liepaja with, pollution dispersion modelling .....	43
3.2.1. Development of cumulative effect evaluation model.....	43
3.2.2. Results of cumulative effect evaluation.....	43
3.3. Validation of cumulative effect evaluation results in Liepaja and Riga.....	45
3.4. Methodology for the use of developed cumulative effect evaluation models .....	46
4. CONCLUSIONS .....	47
GALVENO IZMANTOTO AVOTU SARAĶSTS / BIBLIOGRAPHY.....	48

# 1. TĒMAS AKTUALITĀTE

Informācija par gaisa piesārņojumu parasti tiek iegūta, izmantojot dažādas vides parametru metodes – gan nepārtrauktus, automatizētus mērījumus, gan piesārņojuma izkliedes modelēšanu. Pašreizējie risinājumi pilda savu pamatmērķi – novērtē esošās situācijas atbilstību vides kvalitātes normatīviem. Tomēr jaunākie pētījumi parāda, ka gaisa piesārņojuma jomā pastāv slēpti, grūti pamanāmi draudi – sinerģiskais efekts – palielināta ietekme uz dzīvīem organismiem, kuru rada dažādu piesārņojošo vielu un vides faktoru mijiedarbība. Piemēram, ozons sajaucoties ar citiem piesārņotājiem, rada lielāku ietekmi uz cilvēku veselību nekā iedarbojoties atsevišķi (Mauderly and Samet, 2009). Šādi mijiedarbības efekti ir ļoti sarežģīti un ir atkarīgi no daudzu faktoru kombinācijām – laikapstākļiem, gaisa temperatūras, mitruma, ekspozīcijas u.c. (Stylianou and Nicolich, 2009; Su et al., 2012) – līdz ar to, tos nav vienkārši novērtēt.

Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējuma metožu attīstību kavē atbilstošu pētījumu trūkums (Callahan and Sexton, 2007) – sinerģiskais efekts visbiežāk ir apskatīts tikai pašu vienkāršāko mijiedarbību formā un pārsvarā laboratorijas apstākļos (Meek et al., 2011; Monosson, 2005). Tāpēc, izmantojot esošās zināšanas par piesārņojošo vielu mijiedarbībām, vides parametru metodes vienas pašas nevar kalpot kā efektīvs instruments sinerģiskā piesārņojuma novērtēšanai.

Alternatīva ir bioindikācija – piesārņojuma līmeņa noteikšana pēc tā iedarbības uz konkrētiem dzīvīem organismiem, jeb bioindikatoriem. Šādi nav iespējams noteikt precīzas piesārņojošo vielu koncentrācijas gaisā, bet ar bioindikācijas palīdzību var efektīvi novērtēt dzīvu organismu veselības stāvokli noteiktā piesārņojuma līmenī (Tiwari, 2008; Conti and Cecchetti, 2001). Tomēr arī bioindikācija atsevišķi nevar tikt izmantota kā efektīvs sinerģiskā piesārņojuma novērtēšanas risinājums, jo nav iespējams pateikt vai konstatētie indikatororganismu bojājumi ir radušies atsevišķu piesārņotāju iedarbības rezultātā vai arī to cēlonis ir sinerģiskais efekts.

Tā kā abi esošie gaisa kvalitātes novērtēšanas paņēmieni, katrs atsevišķi, nav efektīvi izmantojami sinerģiskā efekta novērtēšanā, tos var apvienot. Pieņemot, ka sinerģiskā efekta gadījumā dzīvīem organismiem vajadzētu iegūt lielākus bojājumus nekā tam vajadzētu būt konkrētajā piesārņojuma līmenī, bioindikācijas un vides parametru metožu apvienošana vienā integrētā risinājumā varētu radīt jauno sinerģiskā efekta novērtēšanas metodi, kas ļautu izmērīt tā radītos “papildus bojājumus” un līdz ar to arī pašu sinerģisko efektu. Šāds integrēts sinerģiskā efekta novērtēšanas risinājums varētu būtiski uzlabot gaisa kvalitātes monitoringa efektivitāti, jo papildus esošajiem mērījumiem tiktu novērtēti arī piesārņotāju un vides faktoru mijiedarbības radītie draudi.

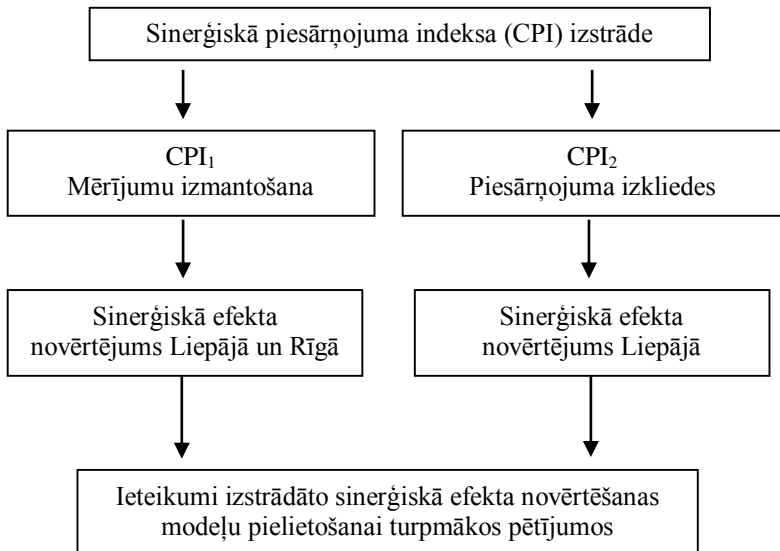
## 1.1. Promocijas darba mērķis un uzdevumi

Izstrādāt bioindikācijā un vides parametru metodē balstītu sinerģiskā efekta novērtēšanas modeli un pārbaudīt to praksē, veicot gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumu Liepājā un Rīgā.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai noteiktie uzdevumi:

1. Raksturot gaisa piesārņojuma un tā ietekmes novērtējuma problemātiku;
2. Izstrādāt gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanas modeli, kas balstīts bioindikācijā un vides parametru metodē;
3. Aprobēt izstrādāto modeli un novērtēt tā praktisko pielietojamību, veicot gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumu Liepājā un Rīgā.

## 1.2. Promocijas darba struktūra



### 1.3. Pētījuma zinātniskā novitāte un praktiskā nozīmība

- Pirmo reizi Latvijā veikts gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējums. Analizēta tādu faktoru kā gaisa temperatūra, mitrums un “ielu kanjonu” veidotā mikroklimata ietekme sinerģiskā efekta veidošanā.
- Pētījuma gaitā pielietota jauna pieeja gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanā – bioindikācijas un gaisa kvalitātes mērījumu apvienošana vienā integrētā modelī.
- Izstrādāta vispārināta gaisa piesārņotāju mijiedarbības novērtēšanas metode – sinerģiskā piesārņojuma indekss CPI.
- Balstoties uz sinerģiskā piesārņojuma indeksa metodi, izstrādāti divi specializēti gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļi – viens kā datu avotu izmanto automātiskās gaisa kvalitātes mērījumu stacijas, otrs – piesārņojuma izkliedes modelēšanu.

### 1.4. Promocijas darba rezultātu aprobācija

#### Zinātniskās publikācijas

Žurnālu raksti:

Kalniņš, V. Cumulative air pollution evaluation model in air quality monitoring: merging bioindication and pollution measurements. *Pollution Research*. 2015, vol. 34, pp. 21-29. (SCOPUS)

Kalniņš, V. Cumulative Impact Evaluation In Central Part of Liepaja with Cumulative Pollution Index Method and Air Pollution Dispersion Modelling. *Proceedings of the Latvia University of Agriculture*. 2015, vol. 33, pp. 2-7.

Kalniņš, V. Bioindication based cumulative effect evaluation for air pollution monitoring in cases when monitored pollutant values do not exceed breakpoint values. *Innovations and Technologies News*, 2012, vol. 2, pp. 3-10.

Publikācijas konferenču rakstu krājumos:

Kalniņš, V., Straupe I., Sudārs, R. Evaluation of cumulative air pollution in Riga and Liepaja with Cumulative Pollution Index method. *Research for Rural Development 2014, Annual 20th International Scientific Conference Proceedings*. 2014, vol. 2, pp. 127-132. (SCOPUS)



Kalniņš, V. Bioindication solutions integration in air quality reporting systems. *Liepājas Universitātes 16. starptautiskās zinātniskās konferences rakstu krājums*. 2014, pp. 407-413.

Kalniņš, V. Citizen science approach in bioindication based air pollution monitoring. *Liepājas Universitātes 15. starptautiskās zinātniskās konferences rakstu krājums*. 2013, pp. 458-464.

Kalniņš V. 2012. Assessment of Bioindication Methods in Air Pollution monitoring. *Research for Rural Development 2012" Annual 18th International Scientific Conference Proceedings*. 2012, vol. 2, pp. 117-121. (SCOPUS)

### **Ziņojumi konferencēs**

Kalniņš, V. Evaluation of cumulative air pollution impact in Liepāja. *Liepājas Universitātes 17. starptautiskā zinātniskā konference*. Liepāja, Latvija, 22. – 23. maijs, 2014. Stenda referāts.

Kalniņš, V., Straupe I., Sudārs, R. Evaluation of cumulative air pollution in Riga and Liepāja with Cumulative Pollution Index method. *Research for Rural Development 2014, Annual 20th International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 21 – 32 May, 2014.

Kalniņš, V. Bioindication solutions integration in air quality reporting systems. *Liepājas Universitātes 16. starptautiskā zinātniskā konference*. Liepāja, Latvija, 23. – 24. maijs, 2013.

Kalniņš, V. Citizen science approach in bioindication based air pollution monitoring. *Liepājas Universitātes 15. starptautiskā zinātniskā konference*. Liepāja, Latvija, 17. – 18. maijs, 2012.

Kalniņš V. Assessment of Bioindication Methods in Air Pollution monitoring. *Research for Rural Development 2012" Annual 18th International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 16 – 18 May, 2012.

Kalniņš, V. Bioindikācijā balstīta gaisa piesārņojuma monitoringa tīklu plānošana un kumulatīvā efekta novērtēšana. *Latvijas Universitātes 71. konference*. Rīga, Latvija, 30. janvārī, 2013.

## 2. MATERIĀLS UN METODES

### 2.1. Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšana, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas Liepājā un Rīgā

#### 2.1.1. Sinerģiskā efekta novērtēšanas process

Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanai Rīgā izvēlēts centra rajons kur, balstoties uz Rīgas domes Mājokļu un vides departamenta 2008. gada izklīdes modelēšanu, ir visaugstākais koncentrācijas līmenis tiem piesārņotājiem, kam Rīgā visbiežāk konstatēta pieļaujamās normas pārsniegšana – NO<sub>2</sub> un putekļu daļiņām PM<sub>10</sub> (Rīgas dome, 2011). Kā pētījuma vietas izvēlētas abas centra rajona gaisa kvalitātes mērījumu stacijas:

- Brīvības ielā 73
- Kr. Valdemāra ielā 18

Sinerģiskā efekta novērtējuma vietas izvēle Liepājā – Kalpaka iela 34 balsfīta uz datu pieejamību, jo šeit atrodas vienīgā Liepājas pilsētas automatizētā gaisa piesārņojuma mērījumu stacija (LVĢMC, 2011).

Pētījuma ietvaros sinerģiskais efekts izteikts ar vienādojumu:

$$C = \frac{B}{M} \quad (1)$$

kur:

C – sinerģiskais efekts / *cumulative effect*;

B – bioindikācijas pētījuma rezultāti attiecībā pret piesārņojuma līmeni, izteikti ar kvantitatīvu rādītāju / *bioindication results*;

M – piesārņojuma mērījumu rezultāti attiecībā pret piesārņojuma līmeni, izteikti ar kvantitatīvu rādītāju / *pollution measurements*.

Indeksa M aprēķināšanai 1. vienādojumā, no pētījumā izmantotajām automātiskajām gaisa piesārņojuma mērījumu stacijām Rīgā un Liepājā iegūti mērījumu dati par katru mēnesi laika posmā no 01.02.2013. līdz 01.01.2014.

No visām piesārņojošajām vielām, kas mēritas katrā stacijā, sinerģiskā efekta novērtēšanai izvēlētas tādas vielas, kam atbilstoši Ministru kabineta noteikumos Nr. 1290 “Noteikumi par gaisa kvalitāti”, pieļaujamā norma ir noteikta laika periodam mazākam par vienu kalendāro mēnesi – vidējam laikam, kas nepieciešams aktīvo bioindikācijas metožu pielietošanai (Nimis et al., 2002) un kas ietekmē bioindikatorus – ķērpjus.

Sinerģiskā efekta aprēķinam izmantoti sekojoši piesārņotāji:

- Rīgā, Brīvības ielā 73 – SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>;
- Rīgā, Kr. Valdemāra ielā 18 – NO<sub>x</sub>, NO, O<sub>3</sub>, CO;
- Liepājā – SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, CO.

Paralēli gaisa piesārņojuma mērījumiem, lai iegūtu nepieciešamos datus sinerģiskā efekta aprēķināšanai 1. vienādojumā, veikts lihenoidinkācijas novērtējums – pie katras monitoringa stacijas galveno mēraparātu augstumā novietoti caurspīdīgas, perforētās plastmasas kastes ar ķērpju paraugiem.

Pētījumā izmantotas trīs ķērpju sugas, kas sastopamas Latvijas pilsētās (Piterāns & Bērziņa, 1990) – dzeltenais sienas ķērpis *Xanthoria parietina* (L.), rievainā parmēlija *Parmelia sulcata* (Taylor) un ošu ramalīna *Ramalina fraxinea* (L.). Konkrētas sugas izvēlētas no dažādām jutības grupām, lai izslēgtu atsevišķu ķērpju individuālās jutības īpatnības pret specifiskiem piesārņotājiem vai vides faktoriem:

- *Ramalina fraxinea* (L.) – jutīgs pret gandrīz visām izplatītākajām gaisu piesārņojošām vielām (Nimis et al., 2002);
- *Parmelia sulcata* (Taylor) – vidēji jutīgs pret SO<sub>2</sub> (Hawksworth and Rose 1970; Peterson et al. 1992), tajā pašā laikā jutīgs pret citiem piesārņotājiem, piemēram, O<sub>3</sub> (Ross & Nash 1983; Ryan 1990; Peterson et al. 1992);
- *Xanthoria parietina* (L.) – izturīgs ķērpis, kuru ietekmē tikai augsts gaisa piesārņojums (Hawksworth and Rose 1970; Perkins & Millar 1987b).

Ķērpju paraugu ievākšanas vieta atradās Liepājā – piepilsētas mežā netālu no Dienvidu forta drupām (koordinātas: 56, 284841; 21, 000106). Konkrētās vietas izvēli noteica pēdējās pieejamās gaisa piesārņojuma izkliedes modelēšanas dati par šo Liepājas pilsētas daļu. Tie parāda, ka izvēlēta vieta ir ārpus visām Liepājas pilsētā konstatētajām gaisa piesārņojuma izplatības zonām, un gaiss tajā ir vērtējams kā relatīvi tīrs (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2004).

Katru mēnesi laika posmā no 01.02.2013. līdz 01.01.2014. paraugu ievākšanas vietā Liepājā ievākti 4 cm lieli ķērpju paraugi, ievietoti perforētās caurspīdīgās plastmasas kastēs un nogādāti sinerģiskā efekta novērtējuma vietās. Lai transportēšanas laikā ķērpju paraugiem novērstu gaisa piekļuvi, perforētās kastes ievietoja hermētiskās kastēs.

Pēc novietošanas uz automātiskajām mērījumu stacijām perforētās kastes tur atstāja 1 mēnesi, pēc tam noņēma, atkal ievietoja hermētiskās kastēs un nogādāja Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Augsnes agroķīmisko analīžu laboratorijā, lai veiktu hlorofila-feofitīna daudzuma attiecības mērījumus.

### 2.1.2. Kamerālo darbu metodika

Katru mēnesi pētījuma laika periodā mērīta hlorofila un feofitīna daudzuma attiecība ķērpju paraugos – relatīvi universāls gaisa piesārņojuma radīto bojājumu indikators (Tretiach et al., 2007; Riddell et al., 2012).

Pēc nogādāšanas laboratorijā ķērpju paraugus atbrīvoja no augsnes, putekļu u.c. cieto daļiņu nosēdumiem, skaloja ar destilētu ūdeni un ievietoja mēģenēs. Lai novērtētu piesārņojuma radītos bojājumus, no ķērpju paraugiem izdalīja hlorofilu un feofitīnu, pielietojot visā pasaulē populāro Ronena un Galuna metodi (Ronen & Galun, 1984). Atbilstoši metodes aprakstā dotajai procedūrai ķērpju paraugiem pievienoja dimetilsulfoksīdu (DMSO) un tos karsēja 45 minūtes 65 °C temperatūrā, rezultātā iegūstot DMSO šķīdumu ar abiem nepieciešamajiem pigmentiem.

Iegūto šķīdumu ievietoja spektrofotometrā, lai izmērītu gaismas absorbciju Ronena un Galuna metodes aprakstā norādītajos hlorofilu un feofitīnu raksturojošos viļņu garumos – attiecīgi 415 and 435 nm. Rezultāti, izmantojot spektrofotometrā iebūvēto aparātprogrammatūru, izteikti ar optiskā blīvuma koeficientu atbilstoši Lamberta – Bera likumam.

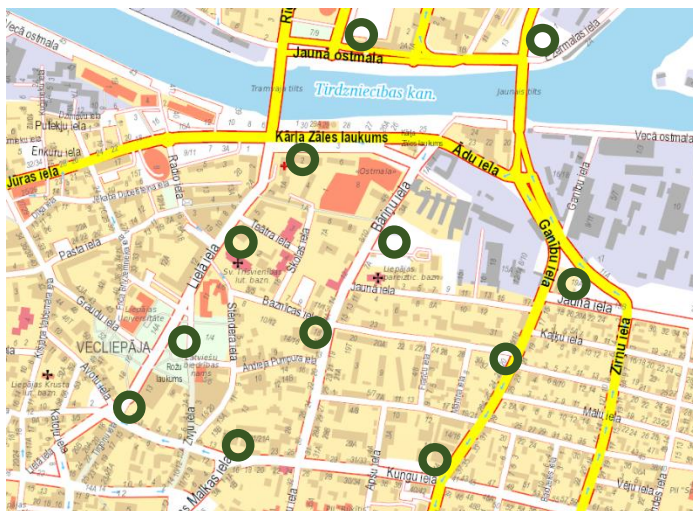
Visas iegūtās optiskā blīvuma vērtības apkopotas Microsoft Excel tabulā, sagrupējot pēc ķērpju sugas, mēneša un gaisa kvalitātes monitoringa stacijas, kur konkrētais ķērpju sugas paraugs bija novietots. Lai nodrošinātu iegūto optisko blīvumu savstarpēju salīdzināmību, visiem paraugiem izmantots vienāds DMSO daudzums – 5 ml, un pirms ekstrakcijas procesa uzsākšanas visi paraugi nosvērti un iegūtās optiskā blīvuma vērtības izteiktas pret vienu ķērpja parauga masas vienību (OD/g). Tālāk tās izmantotas šajā promocijas darbā izstrādātajā modelī gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta aprēķināšanai.

## 2.2. Sinerģiskā efekta novērtējums satiksmes radītajam gaisa piesārņojumam Liepājā, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu

Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanai Liepājā, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu, izvēlēta Liepājas pilsētas centrālā daļa.

Konkrētas teritorijas izvēli noteica datu pieejamība, jo par to bija pieejami gan piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultāti, gan bioindikācijas pētījums – autotransporta ietekmes uz gaisa kvalitāti novērtējums Liepājas centrā (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007), kā arī tajā pašā laikā veikts ķērpju sugu un to seguma novērtējums (Kalniņš, 2009).

Pētījuma teritorija robežojas ar Jauno ostmalu (Z), tālāk ar Ganību ielu (A), Kungu ielu (D) un Lielo ielu (R) (2.1. att.).



Pamatkarte – kartes.lv, autora veidots

**2.1. att. Satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta Liepājas centrālajā daļā aprēķināšanas punktu teritoriālais izvietojums / *Evaluation points of traffic pollution cumulative effect in central part of Liepaja***

Tā kā izklīdes modelēšanas dati aptvēra visu analizēto teritoriju, bet bioindikācijas dati bija pieejami tikai par tām vietām, kurās ir koki vai krūmi, pamatojoties uz bioindikācijas datu pieejamību, Liepājas centrālajā daļā izvēlēti 12 punkti gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanai (2.1. att.)

Precīzs sinerģiskā efekta novērtējuma punktu apraksts, to atrašanās vietas un koordinātas ir dotas 2.1. tabulā.

2.1. tabula

**Satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta Liepājas centrālajā daļā novērtējuma punktu koordinātas / *Coordinates of the cumulative pollution evaluation points in Liepaja***

Nr.	Ģeogrāfiskās koordinātas / Geographic coordinates	Nosaukums / Place
1	56.507034; 21.010184	Tirgoņu un Kungu ielas krustojums
2	56.506490; 21.013304	Malkas un Kungu ielas krustojums

## 2.1. tabulas turpinājums

Nr.	Ģeogrāfiskās koordinātas / <i>Geographic coordinates</i>	Nosaukums / <i>Place</i>
3	56.506313; 21.019863	Kungu un Ganību ielas krustojums
4	56.508299; 21.011569	Rožu laukums
5	56.508835; 21.015131	Baznīcas iela
6	56.508299; 21.022196	Baznīcas un Ganību ielas krustojums
7	56.510092; 21.013163	Lielā iela
8	56.510269; 21.017835	Bāriņu iela
9	56.509618; 21.023411	Jaunā iela
10	56.511765; 21.015265	K. Zāles laukums
11	56.513992; 21.015157	Jaunā ostmala
12	56.513966; 21.022977	Ganību un Ezermalas ielas krustojums

Sinerģiskais efekts izteikts ar vienādojumu:

$$C = \frac{B}{D} \quad (2)$$

kur:

C – sinerģiskais efekts / *cumulative effect*;

B – bioindikācijas pētījuma rezultāti attiecībā pret piesārņojuma līmeni, izteikti ar kvantitatīvu rādītāju / *bioindication results*;

D – piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultāti attiecībā pret piesārņojuma līmeni, izteikti ar kvantitatīvu rādītāju / *pollution dispersion modelling*.

Indeksa D aprēķināšanai 2. vienādojumā izmantoti 2007. gada Liepājas centrālās daļas gaisa piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultāti (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007)

Atbilstoši SIA Estonian, Latvian & Lithuanian Environment sniegtajai informācijai piesārņojuma izkliedes modelēšana bija veikta, izmantojot ADMS Roads 2.2 modeli, kā modelējamo vielu izvēloties slāpekļa oksīdus – NO un NO<sub>2</sub>, jo novērtējuma autori uzskatīja, ka konkrētajā teritorijā vienīgais nozīmīgais gaisa piesārņojuma avots ir autotransports, un slāpekļa oksīdi veido lielāko daļu no kopējā emisiju apjoma (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007).

Indeksa B aprēķināšanai (vienādojums Nr. 2) tika izmantoti 2007. gada bioindikācijas pētījuma rezultāti – V. Kalniņa bakalaura darba izstrādes ietvaros ievākta informācija par dažādu ķērpju sugu sastopamību Liepājā un tās centrālajā daļā – ķērpju sugu uzskaitē, segumu raksturojoša skaitliska vērtība un punktu koordinātas vietām, kur konkrētās sugas konstatētas (Kalniņš, 2009).

### 2.3. Darbā izmantotās statistiskās analīzes metodes

Iegūtajiem sinerģiskā efekta novērtējuma rezultātiem veikta dispersijas analīze (One-way ANOVA) un korelācijas analīze, izmantojot Microsoft Excel 2013 ietvertos statistisko analīžu risinājumus. Aprēķināti Pīrsona korelācijas koeficienti zināmajiem faktoriem, kas varētu piedalīties sinerģiskā efekta veidošanā. Pētījuma rezultātu validācijai pielietota arī parciālās korelācijas analīze, izmantojot inversās matricas metodi.

Satiksmes radītā piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējuma rezultātiem veikta telpiskās autokorelācijas analīze. Telpiskās autokorelācijas raksturošanai izmanto Morana I indeksu (Moran, 1950), kuru izsaka skalā no -1 līdz +1, kur:

- -1 līdz 0 – negatīva telpiskā autokorelācija (objektiem ar līdzīgu telpisku novietojumu ir atšķirīgas vērtības);
- 0 līdz +1 – pozitīva telpiskā autokorelācija (objektiem ar līdzīgu telpisku novietojumu ir arī līdzīgas vērtības);
- 0 – telpiskā autokorelācija nepastāv (objektu izvietojums ir nejaušs).

Telpiskās autokorelācijas analīzei promocijas darbā aprakstītā pētījuma ietvaros, izmantots Tartu Universitātes izstrādātais tiešsaistes risinājums telpisko datu apstrādei, kas pieejams interneta vietnē: <http://digiarhiiv.ut.ee/kalkulaator/>

Izmantojot to, aprēķināts Morana I indekss, lai novērtētu, vai konkrētais sinerģiskā efekta teritoriālais izvietojums ir nejaušs, vai arī tas ir veidojies noteiktu saistību (mikroklimata) rezultātā.

2.2. tabula

**Morana I aprēķināšanas parametri satiksmes radītā piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumā Liepājā / *Moran's I calculation data***  
( $\varphi$  – ģeogrāfiskais platums / *latitude*,  $\lambda$  – ģeogrāfiskais garums / *longitude*)

Laukuma robežu koordinātas / <i>Coordinates of the area border</i>	$\varphi$ min	$\varphi$ max	$\lambda$ min	$\lambda$ max
	56.50	56.51	21.01	21.02
Intervālu skaits / <i>Number of intervals</i>	10			
Intervālu garums / <i>Length of intervals</i>	10 m			
p-vērtība / <i>p-value</i>	0.05			

### 3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

#### 3.1. Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšana, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas Liepājā un Rīgā

##### 3.1.1. Sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļa izstrāde

Sinerģiskā efekta matemātiskā modeļa izstrādē kā paraugi tika izmantotas divas savās jomās plašu atpazīstamību ieguvušas metodes – gaisa kvalitātes indekss *Air Quality Index* (AQI) un gaisa tīrības indekss *Index of Atmospheric Purity* (IAP). To aprēķināšanas vienādojumi attiecīgi tika izmantoti 1. vienādojuma indeksu B un M tālākā izstrādē, rezultātā iegūstot 3. vienādojumu:

$$CPI = \frac{\left[ \left( \sum_1^{ns} Q_{ds} \right) / \left( \sum_1^{ns} Q_s \right) \right] \times 100}{\left[ \left( \sum_1^{np} C_p \right) / \left( \sum_1^{np} BP_p \right) \right] \times 100} \quad (3)$$

kur:

CPI – sinerģiskā piesārņojuma indekss / *Cumulative Pollution Index*;

$C_p$  – piesārņotāja p koncentrācija / *concentration of pollutant p*;

$BP_p$  – piesārņotāja p robežvērtība / *breakpoint of pollutant p*;

np – piesārņojošo vielu skaits / *number of pollutants*;

ns – ķērpju paraugu skaits / *number of lichen samples*;

$Q_s$  – nebojāts paraugs / *sample without damage*;

$Q_{ds}$  – bojājumu intensitāte / *damage magnitude*.

Kaut arī 3. vienādojums dotajā formā ir izmantojams sinerģiskā efekta aprēķināšanai, tajā izmantotā bioindikācijas pieeja – ķērpju paraugu bojājumu intensitātes noteikšana ir pārāk vispārināta, tāpēc tas pārveidots tālāk (4. vienādojums), par paraugu ņemot vienu no visplašāk lietotajām bioindikācijas metodēm gaisa piesārņojuma novērtēšanā – hlorofila un feofitīna daudzuma mērījumus ķērpju paraugos (Kalniņš et al., 2014):

$$CPI_1 = \frac{\left[ \left( \sum_1^{ns} P \right) / \left( \sum_1^{ns} C \right) \right] \times 100}{\left[ \left( \sum_1^{np} C_p \right) / \left( \sum_1^{np} BP_p \right) \right] \times 100} \quad (4)$$

kur

$CPI_1$  – sinerģiskā piesārņojuma indekss/ *Cumulative Pollution Index*;

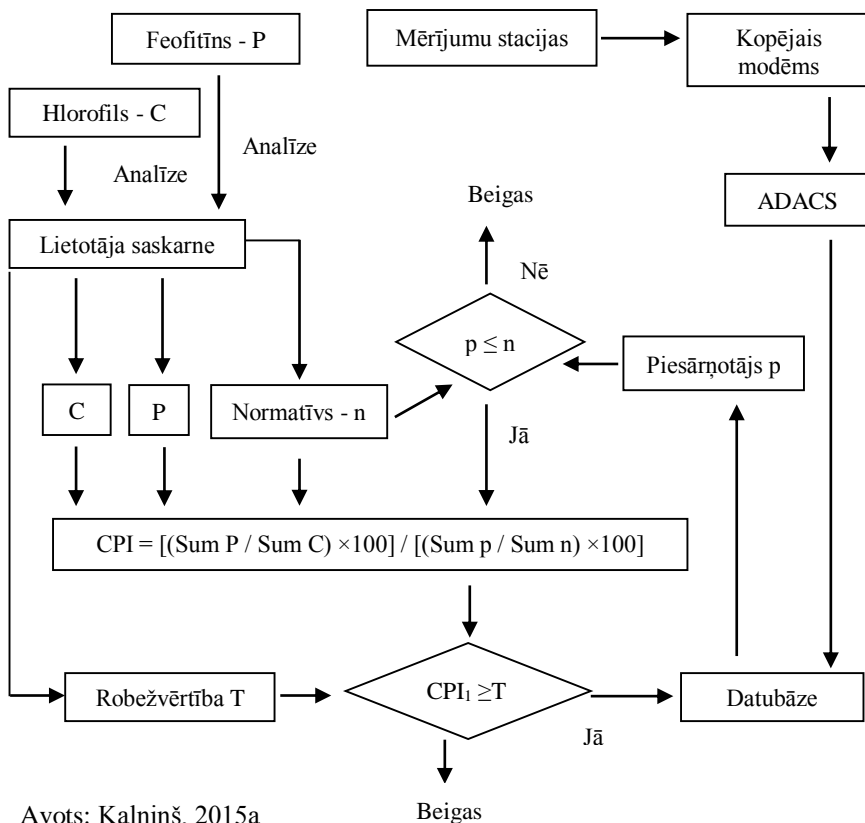
$C_p$  – piesārņotāja p koncentrācija / *concentration of pollutant p*;

$BP_p$  – piesārņotāja / *breakpoint of pollutant p*;



- np – piesārņojošo vielu skaits / *number of pollutants*;
- ns – ķērpju paraugu skaits / *number of lichen samples*;
- C – sākotnējais hlorofila daudzums paraugā / *initial amount chlorophyll amount*;
- P – feofitīna daudzums paraugā / *pheophytin amount*.

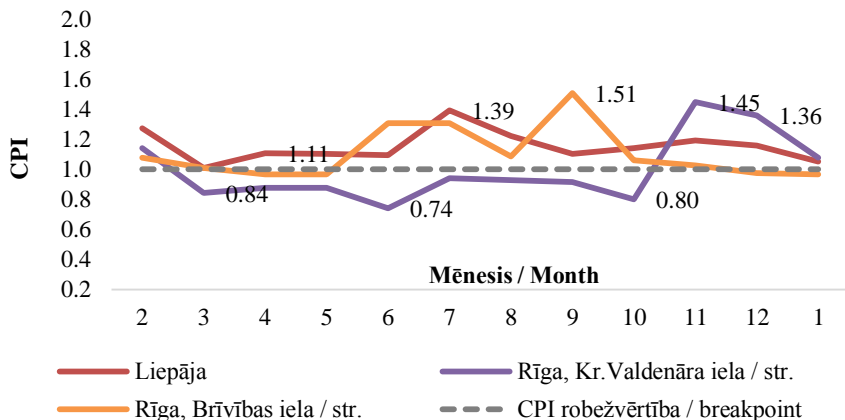
Lai izstrādātu sinerģiskā efekta novērtēšanas modeli, 4. vienādojums pārveidots instrukciju secības shēmā un rezultātā izveidots sinerģiskā efekta novērtēšanas modelis (3.1. att.)



**3.1. att. Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējuma modelis, izmantojot automatiskās mērījumu stacijas / *Cumulative pollution evaluation model with automated measurement stations***

### 3.1.2. Sinerģiskā efekta novērtējuma rezultāti

Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanai izmantoti kamerālo darbu laikā iegūtie dati – hlorofila/feofitīna daudzuma attiecība pie monitoringa stacijām novietotajos ķērpju paraugos un attiecīgo monitoringa staciju mērījumi. Rezultātā aprēķinātas sinerģiskā piesārņojuma indeksa CPI vērtības katram kalendārajam mēnesim – 3.2. att.



Avots: Kalniņš et al., 2014

#### 3.2. att. **CPI indekss pa mēnešiem gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanā Rīgā un Liepājā, izmantojot automatiskās mērījumu stacijas / Monthly CPI values in cumulative pollution evaluation with automated measurement stations**

Atbilstoši 3.2. att. abās pētījuma vietās – Liepājā un Rīgā, konstatēts sinerģiskais efekts. Liepājā CPI vērtība virs robežvērtības ir gandrīz visā gada garumā, izņemot martu, Rīgā – no jūnija līdz oktobrim (Brīvības ielā) un februārī, novembrī, decembrī, janvārī (Kr. Valdemāra ielā).

Lai pārliecinātos, ka gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumā, izmantojot automatiskās mērījumu stacijas, iegūtās CPI vērtības parāda sinerģisko efektu nevis bioloģisku faktoru izraisītas hlorofila-feofitīna daudzuma svārstības ķērpju paraugos, veikta dispersijas analīze divām faktoru grupām, kuras atbilstoši citu autoru pētījumiem varētu būt iesaistītas sinerģiskā efekta veidošanā:

- Piesārņotāji (Mauderly and Samet, 2009; Bell et al., 2011; Stylianou and Nicolich, 2009; Su et al., 2012);
- Piesārņotāji apvienojumā ar meteoroloģiskajiem faktoriem – gaisa temperatūru un mitrumu (Daniel, et al., 2003; Roberts, 2004).

Vispirms CPI vērtības sagrupētas atbilstoši iepriekš minētajām potenciālo ietekmes faktoru grupām, un tad veikta dispersijas analīze.

Visās pētījuma vietās – Liepājā, Brīvības ielā 73 un Kr. Valdemāra ielā 18 Rīgā, konstatēta būtiska ietekme gan piesārņotāju, gan apvienotajai piesārņotāju un meteoroloģisko faktoru grupai ( $F_{\text{fact.}} < F_{\text{crit.}}$  pie  $\alpha = 0.05$ ).

Lai noskaidrotu atsevišķu faktoru lomu CPI indeksa veidošanā sinerģiskā efekta novērtējumā izmantojot mērījumu stacijas, veikta korelācijas analīze atsevišķiem faktoriem – piesārņotājiem, gaisa temperatūrai un mitrumam.

Abās pētījumu vietās – Liepājā un Rīgā tika konstatēta gaisa piesārņojuma korelācija ar CPI vērtībām. Liepājā vērojama izteikta CPI korelācija ar  $\text{NO}_x$  –  $R = 0.72$ , savukārt Rīgā Brīvības ielā ar  $\text{O}_3$  –  $R = 0.90$  un  $\text{NO}_x$  –  $R = 0.96$  (3.1. tabula).

3.1. tabula

**CPI korelācija ar dažādām gaisu piesārņojošām vielām sinerģiskā efekta novērtējumā Liepājā un Rīgā, izmantojot automatiskās mērījumu stacijas / CPI correlation with pollutants (\* $p < 0.05$ )**

Vieta / Site	Pīrsona korelācijas koeficients / <i>Pearsons's R</i>			
	$\text{O}_3$	$\text{NO}_x$	$\text{SO}_2$	CO
Liepāja	0.24	0.72*	0.54	-
Rīga Brīvības iela /Str.	0.90*	0.96*	0.37	-
Rīga Valdemāra iela /Str.	0.68	0.15	-	0.45

Neskatoties uz to, ka arī citiem piesārņotājiem ir vērojama korelācija ar CPI vērtībām, piemēram,  $\text{SO}_2$  Liepājā ( $R = 0.54$ ) un  $\text{O}_3$  Kr.Valdemāra ielā Rīgā ( $R = 0.68$ ), tie nav statistiski būtiski –  $p > 0.05$ . Īpaši izteikta statistiskās ticamības līmeņa problēma ir rezultātiem no Kr.Valdemāra ielas Rīgā, kur neviena piesārņotāja korelācija ar CPI nav statistiski būtiska (3.1. tabula).

Bet p vērtības, kas ir lielākas par 0.05 ne vienmēr nozīmē to, ka iegūtie rezultāti ir nejauši vai kļūdaini. Viens no izplatītākajiem skaidrojumiem šādos gadījumos ir neliels paraugu skaits, kā rezultātā p vērtības bieži ir paaugstinātas

un rodas kļūdaini pieņēmumi par zemu statistisko ticamību (du Prel, et al., 2009; Gail & Feinn, 2012; Lew, 2012).

Tāpēc pilnībā nevar izslēgt iespējamību, ka arī statistiski nebūtiskajiem faktoram ir bijusi kāda loma sinerģiskā efekta veidošanā. Lai sniegtu atbildes uz šo jautājumu, ir nepieciešami plašāki pētījumi ilgākā laika periodā.

Izvērtējot sinerģisko efektu, kā arī CPI vērtību veidojošos faktoros, nevar ņemt vērā tikai atsevišķas piesārņojošas vielas – ir zināms, ka būtiska ietekme sinerģiskā efekta veidošanā ir arī meteoroloģiskiem faktoriem (Roberts, 2004; Callahan and Sexton, 2007). Tas, ka CPI korelācija ar gaisa piesārņojošo vielu koncentrācijas svārstībām gan Liepājā, gan Rīgā ir ļoti pārlicinoša ( $R = 0.90$  līdz  $0.96$ ), ņemot vērā sinerģiskā efekta vispārējo definējumu (piesārņojošo vielu mijiedarbības kopējais efekts), ir tikai loģiski. Bet tas neizskaidro, kāpēc gandrīz visās mērījumu vietās visaugstākās CPI vērtības, respektīvi, arī sinerģiskais efekts ir tieši vasaras mēnešos (3.1. att.).

Atbildes uz jautājumu par meteoroloģisko faktoru ietekmi CPI vērtību veidošanā var sniegt CPI un meteoroloģisko faktoru – gaisa temperatūras un mitruma korelācijas izvērtējams.

Atšķirībā no piesārņojuma līmeņa korelācijas meteoroloģisko faktoru ietekmes izvērtējama rezultāti ir ļoti mainīgi – katrā mērījumu vietā tie ir atšķirīgi un variē relatīvi lielā amplitūdā. Šeit atkal parādās statistiskā nozīmīguma problēma –  $p > 0.05$  ir tikai CPI korelācijai ar gaisa temperatūru Liepājā un Brīvības ielā Rīgā, kā arī CPI korelācijai ar gaisa mitrumu Kr. Valdemāra ielā Rīgā (3.2. tabula).

3.2. tabula

**CPI korelācija ar meteoroloģiskajiem faktoriem sinerģiskā efekta novērtējumā Liepājā un Rīgā, izmantojot automatiskās mērījumu stacijas / CPI correlation with meteorological factors (\* $p < 0.05$ )**

Vieta / Site	Pīrsona korelācijas koeficients / <i>Pearsons's R</i>	
	Mēneša vidējā gaisa temperatūra / <i>Temperature (°C)</i>	Relatīvais mitrums / <i>Humidity (%)</i>
Liepāja	0.61*	0.38
Rīga Brīvības iela / <i>Str.</i>	0.58*	0.17
Rīga Valdemāra iela / <i>Str.</i>	0.37	0.78*

Nemot vērā tikai statistiski ticamos rezultātus, Liepājā ir vērojama pārliecinoša CPI korelācija ar mēneša vidējās gaisa temperatūras izmaiņām (3.2. tabula) –  $R = 0.61$ . Nedaudz zemākā korelācija starp iegūtajām CPI vērtībām un mēneša vidējo gaisa temperatūru ir arī Brīvības ielā Rīgā –  $R = 0.58$ . Pilnībā atšķirīgi rezultāti iegūti otrajā Rīgas mērījumu vietā – Brīvības ielai paralēlajā Kr. Valdemāra ielā (3.2. tabula) Šeit tika konstatēta ļoti izteikta CPI korelācija ar gaisa relatīvā mitruma izmaiņām –  $R = 0.78$ .

Situācijas vērtējumu daudz skaidrāku padarītu precīzs gaisa temperatūras un mitruma izmaiņu salīdzinājums konkrētajās vietās Liepājā un Rīgā, kur veikti sinerģiskā efekta pētījumi. Bet tā kā gan Rīgas domei piederošās mērījumu stacijas, gan LVĢMC mērījumu stacija Liepājā nav aprīkota ar meteoroloģiskiem mērinstrumentiem, šāds salīdzinājums diemžēl nav iespējams.

No sinerģiskā efekta novērtējuma viedokļa būtiski ir tas, ka Brīvības ielā Rīgā korelācija ar CPI vērtībām ir vienlaicīgi diviem piesārņotājiem –  $\text{NO}_x$  un  $\text{O}_3$ , kas norāda uz šo abu vielu iespējamu savstarpēji papildinošu iedarbību jeb sinerģisko efektu.  $\text{O}_3$  un  $\text{NO}_x$  mijiedarbība ir parādīta daudzos pētījumos (Goldstein, 1976; Gelzleichter et al., 1992; O'Neil et al, 1995). Cilvēku un dzīvnieku organismā šie abi piesārņotāji nonāk elpošanas procesā, kur tie saskaras ar elpceļu sieniņu šķidrumiem. To sastāvā esošie antioksidanti reaģē ar  $\text{NO}_x$  un būtiski samazina audu aizsardzību no oksidētājiem, ieskaitot ozonu (Gamon et al., 2014).  $\text{O}_3$  un  $\text{NO}_x$  mijiedarbība notiek arī bioķīmiskā līmenī – slāpekļa oksīdi un ozons ir iesaistīti vairākās ķīmiskās reakcijas, kuru laikā rodas  $\text{NO}_3$  un  $\text{N}_2\text{O}_5$ , kuri savukārt ir iesaistīti tālākās reakcijās, bojājot dažādas olbaltumvielu struktūras (Gamon et al., 2014).

Gaisa temperatūras un piesārņojuma savstarpējā iedarbība, kāda konstatēta Liepājā un Rīgā, ir pierādīta vairākos pētījumos. Daudzi pētījumi norāda uz saistībām starp ozona koncentrāciju un gaisa temperatūru – 21-23 °C temperatūras diapazonā  $\text{O}_3$  rada elpošanas sistēmas traucējumus (Horstman et al., 1990; Adams 2003, Adams, 2006), bet, temperatūrai paaugstinoties,  $\text{O}_3$  radītais kaitējums palielinās (Gong et al., 1986; Foster et al. 2000). Dažos pētījumos ir konstatēta arī  $\text{O}_3$  un gaisa temperatūras sinerģiskā ietekme uz augiem (Elampari, et al., 2013), kas norāda uz iespējamību, ka  $\text{O}_3$  un gaisa temperatūras sinerģiskā mijiedarbība sniedzas tālāk par ietekmi uz elpošanas orgānu sistēmu un, iespējams, ietekmē arī daudzus dzīvības procesus bioķīmiskā līmenī – kā tas ir  $\text{O}_3$  un  $\text{NO}_x$  mijiedarbības gadījumā.

Tā kā sinerģiskā efekta novērtējumā iegūtie rezultāti ir pamatojami ar citu autoru līdzīgos pētījumos iegūtām atziņām, var uzskatīt, ka sinerģiskais efekts Liepājā un Rīgā pētījuma laikā ir konstatēts, un izstrādātais modelis (3.1. att.) pilda savu funkciju un izmantojams praktiskiem mērķiem – sinerģiskā efekta mērījumiem gaisa kvalitātes monitoringa ietvaros.

## 3.2. Sinerģiskā efekta novērtējums satiksmes radītajam gaisa piesārņojumam Liepājā, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu

### 3.2.1. Sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļa izstrāde

Satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļa izstrādē bija nepieciešama īpaša pieeja, jo šajā gadījumā gaisa kvalitātes mērījumu vietā bija jāizmanto izkliedes modelēšana.

Kā redzams 2. vienādojumā, lai aprēķinātu sinerģisko efektu, nepieciešamas divas sākuma vērtības – piesārņojošo vielu koncentrācija un bioindikācijas pētījuma rezultāti, iegūti vienā un tajā pašā punktā. Vielu koncentrācijas datus par jebkuru novērtējamās teritorijas punktu var iegūt ar izkliedes modelēšanas palīdzību, atliek tikai bioindikācijas datu ieguve. Lai to paveiktu, ir nepieciešams novērtēt bioindikatoru stāvokli plašā teritorijā, tāpēc vispiemērotākās šajā gadījumā ir pasīvās (ķērpju daudzveidības novērtējuma) metodes, piemēram, gaisa tīrības indeksa IAP – metode, kuru lieto lielākajā daļā bioindikācijas pētījumu ar mērķi novērtēt gaisa kvalitāti (Falla et al., 2000; Nimis et al., 2002). Apvienojot IAP ar iepriekš izstrādāto vienādojumu sinerģiskā efekta novērtēšanai, izmantojot automatiskajās mērījumu stacijas (4. vienādojums), rezultāts ir sekojošs (Kalniņš, 2015b):

$$CPI_2 = \frac{[(IAP_C - IAP)/(IAP_C - 1)] \times 100}{\left[ \left( \sum_1^{np} C_p \right) / \left( \sum_1^{np} BP_p \right) \right] \times 100} \quad (5)$$

kur:

$CPI_2$  – sinerģiskā piesārņojuma indekss / *Cumulative Pollution Index*;

$C_p$  – piesārņotāja  $p$  koncentrācija / *concentration of pollutant  $p$* ;

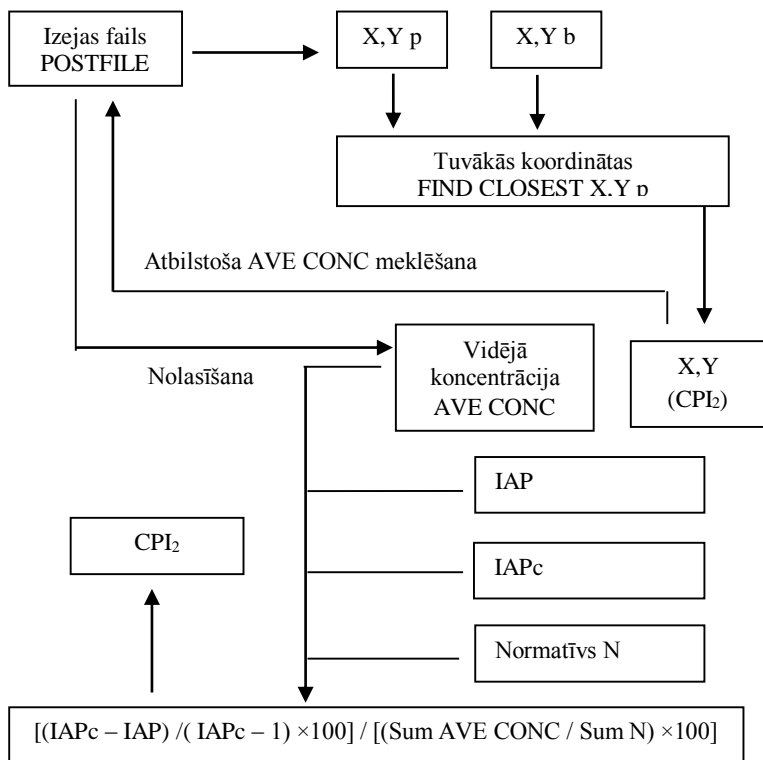
$BP_p$  – piesārņotāja  $p$  robežvērtība / *breakpoint of pollutant  $p$* ;

$np$  – piesārņotāju skaits / *number of pollutants*;

IAP – IAP vērtība parauglaukumā / *IAP value*;

$IAP_C$  – IAP vērtība kontrollaukumā ar tīru gaisu / *IAP in control site*.

Tādējādi sinerģiskais efekts ir izteikts kā starpība starp gaisa piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultātiem un konkrētajā vietā iegūtās IAP vērtības attiecību pret IAP vērtību kontrollaukumā ar tīru gaisu (5. vienādojums). Lai šo vienādojumu varētu integrēt gaisa piesārņojuma izkliedes modelēšanas informācijas plūsmā, tas uzrakstīts kā instrukciju secības shēma un izveidots sinerģiskā efekta novērtēšanas modelis (3.3. att.).



Avots: autora veidots

### 3.3. att. Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējuma modelis, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu / *Cumulative pollution evaluation model with dispersion modelling*

Pirmajā posmā tiek salīdzinātas bioindikācijas novērtējuma punktu koordinātas (X,Y b) ar koordinātām izkliedes modelēšanas rezultātu failā POSTFILE (X,Y p), lai atrastu tuvākās vērtības, kuras tālāk tiek atzīmētas kā sinerģiskā efekta novērtējuma koordinātas – (X,Y CPI). Otrajā posmā izkliedes modelēšanas izejas failā POSTFILE tiek meklētas X,Y CPI atbilstošās piesārņojošo vielu koncentrācijas vērtības AVE CONC, šo posmu atkārtojot visām modelēšanā izmantotajām vielām. Atrastās piesārņojuma koncentrācijas vērtības kopā ar attiecīgajām IAP, IAPc vērtībām un robežvērtībām katrai modelēšanā izmantotajai vielai tiek izmantotas CPI aprēķināšanai.

### 3.2.2. Sinerģiskā efekta novērtējuma rezultāti

Sinerģiskā efekta novērtējumam satiksmes radītajam gaisa piesārņojumam, izmantojot izkliedes modelēšanu, Liepājā pielietots izstrādātais modelis (3.3. att.) un sekojoši dati:

- NO un NO<sub>2</sub> (NO<sub>x</sub>) gada vidējās izkliedes modelēšanas rezultāti Liepājas pilsētas centrālajā daļā (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007),
- Ķērpju sugu un to seguma novērtējums Liepājas pilsētā.

Līdzīgi kā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumā, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas, ievietojot abu veidu datus atbilstošajā CPI aprēķināšanas modelī (3.3 att.), aprēķinātas CPI vērtības.

Atbilstoši iegūtajiem rezultātiem (3.3. tabula) sinerģiskais efekts Liepājas centrālajā daļā ir relatīvi liels – CPI svārstās intervālā no 1.36 līdz 1.94 – daudz vairāk kā novērtējumā, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas, kad CPI gan Liepājā, gan Rīgā variē intervālā no 1 līdz 1.39 (3.3. tabula).

3.3. tabula

**Iegūtie rezultāti satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumā Liepājā, izmantojot piesārņojuma izkliedes modelēšanu / CPI results in central part of Liepaja, obtained with dispersion modelling**  
(Kalniņš, 2015b)

Nr.	Ģeogrāfiskās koordinātas / <i>Geographic coordinates</i>	Vietas nosaukums / <i>Site</i>	CPI
1	56.507034; 21.010184	Tirgoņu un Kungu ielas krustojums	1.82
2	56.506490; 21.013304	Malkas un Kungu ielas krustojums	1.65
3	56.506313; 21.019863	Kungu un Ganību ielas krustojums	1.66
4	56.508299; 21.011569	Rožu laukums	1.94
5	56.508835; 21.015131	Baznīcas iela	1.88
6	56.508299; 21.022196	Baznīcas un Ganību ielas krustojums	1.81
7	56.510092; 21.013163	Lielā iela	1.82



### 3.3. tabulas turpinājums

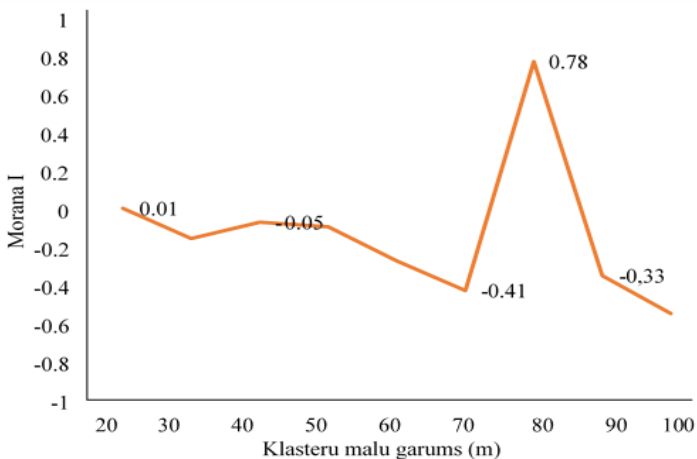
Nr.	Ģeogrāfiskās koordinātas / Geographic coordinates	Vietas nosaukums / Site	CPI
8	56.510269; 21.017835	Bāriņu iela	1.67
9	56.509618; 21.023411	Jaunā iela	1.65
10	56.511765; 21.015265	K. Zāles laukums	1.80
11	56.513992; 21.015157	Jaunā ostmala	1.36
12	56.513966; 21.022977	Ganību un Ezermalas ielas krustojums	1.36

Augsts sinerģiskais piesārņojums ir vērojams visā Lielās ielas garumā (1.8-1.94). Tajā pašā laikā pārējās Liepājas centra daļās CPI vērtības ir gandrīz identiskas – 1.64; 1.65; 1.67, izņemot Baznīcas un Ganību ielas krustojumu, kur sinerģiskais efekts ir gandrīz tik pat augsts kā Lielajā ielā – 1.81 (3.3. tabula). Sinerģiskā efekta minimums konstatēts Jaunajā ostmalā (1.36) – plašā, atklātā vietā blakus Tirdzniecības kanālam, bet maksimums – Rožu laukumā, kur CPI vērtība bija 1.94 (3.3. tabula).

Iegūtajos rezultātos ir vērojama izteikta negatīva korelācija starp gaisa piesārņojuma līmeni un CPI vērtībām ( $R = -0.86$ ). To var skaidrot ar piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultātu un reālā piesārņojuma līmeņa atšķirībām. Fakts, ka modelēšanas rezultāti bieži atšķiras no reālā piesārņojuma, ir zināms no daudziem pētījumiem (Air Quality Modelling Review Steering Group, Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2011; Hirtl & Baumann-Stanzer, 2007). Tāpēc var izdarīt pieņēmumu, ka daudzās vietās Liepājas centrā iegūtie rezultāti uzrāda nevis sinerģisko mijiedarbību radīto “reālo ietekmi” uz ekosistēmu dzīvu organismu veselību, bet gan “reālo ietekmi” tiešā nozīmē – patiesā piesārņojuma līmeņa un izkliedes modelēšanas rezultātu neatbilstību.

Ir arī punkti, kur situācija ir pilnīgi pretēja – Jaunajā ostmalā, izkliedes modelēšanas rezultāti uzrāda augstu gaisa piesārņojumu ( $25-30 \mu\text{g m}^{-3}$ ), bet, neskatoties uz to, CPI vērtības šeit ir viszemākās visā Liepājas centrā – 1.36. Šādas sinerģiskā efekta teritoriālās izplatības īpatnības nevar izskaidrot tikai ar modelēšanas nepilnībām vien.

To, ka 3.3. tabulā redzamais CPI teritoriālais izvietojums nav nejaušs, parāda telpiskās autokorelācijas analīze (3.4. att.) – šajā izvietojumā ir vērojama izteikta klasterizācija (Morana  $I = 0.78$ ) ar klasteru malu garumiem aptuveni 80 m, kas norāda uz noteiktām likumsakarībām sinerģiskā efekta izplatībā.



Avots: Kalniņš, 2015b

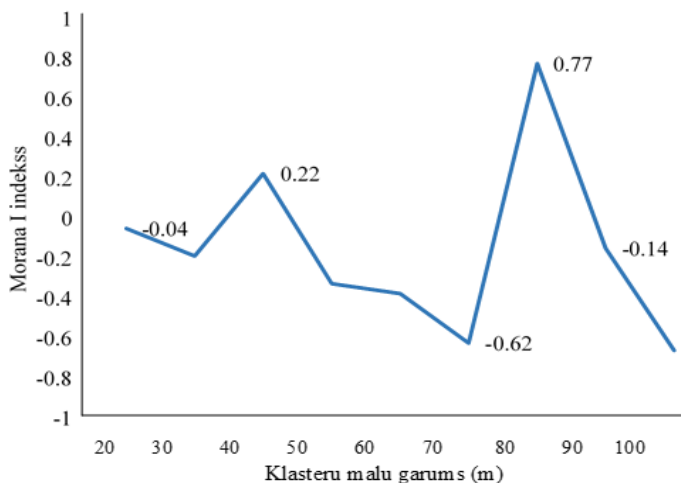
#### 3.4. att. **Morana I indekss satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskajam efektam Liepājas centrālajā daļā / *Moran's I of cumulative air pollution in central part of Liepaja***

Nemot vērā jaunākos pētījumus par pilsētas mikroklimatu, var izvirzīt hipotēzi, ka šādu CPI izvietojumu ir radījusi “ielu kanjonu” ģeometrija. Mikroklimata un ielu kanjonu ģeometrijas ietekme uz gaisa temperatūru un mitrumu – faktoriem, kas var ietekmēt sinerģisko efektu (3.1. un 3.2. tabula) ir pierādīta daudzos pētījumos.

Augstas ēkas rada pastāvīgu ēnu, tādā veidā aizkavējot mitruma iztvaikošanu. Tās arī aiztur vēju, mazinot gaisa apmaiņu. Betona, asfalta un mūra virsmas akumulē siltumu, līdz ar ko paaugstinās apkārtējās vides temperatūra, papildus siltumu dod arī automobiļu izplūdes gāzes utt. (Chen et al., 2010; Idezak et al., 2007; Vardoulakis et al., 2003).

Šādi varētu izskaidrot kāpēc visaugstākās CPI vērtības (1.82-19.4) ir Lielajā ielā – vietā, kuru no visām pusēm apņem relatīvi augstas akmens un mūra ēkas, kamēr viszemākais sinerģiskais efekts (CPI 1.36) ir Jaunajā ostmalā – plašā un atklātā vietā Tirdzniecības kanāla krastos. Šo pieņēmumu apstiprina arī sinerģiskā efekta mērījumos konstatētās īpatnības, kad divās paralēlās ielās Rīgā – Brīvības un Kr.Valdemāra ielās, starp kurām ir dažu desmitu metru attālums, novērotas pilnīgi atšķirīgas sinerģiskā efekta izmaiņas un tā veidošanās cēloņi (3.1. un 3.2. tabula).

Lai pārlicinātos, ka CPI telpiskās autokorelācijas rezultāti rāda sinerģisko efektu, nevis gaisa piesārņojuma izkliedi, veikta telpiskās autokorelācijas analīze SIA Estonian, Latvian & Lithuanian Environment izkliedes modelēšanas rezultātiem tajos pašos punktos, kuros aprēķinātas CPI vērtības.



Avots: Kalniņš, 2015b

### 3.5. att. **Morana I indekss satiksmes rīdītā gaisa piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultātiem Liepājas centrālajā daļā / Moran's I of pollution dispersion in central part of Liepaja**

Abas līknes (3.4. att. un 3.5. att.), lai arī atsevišķos punktos līdzīgas, tomēr būtiski atšķiras kopumā, kas norāda uz to, ka CPI teritoriālā izvietojuma cēloņi nav identiski NO, NO<sub>2</sub> izkliedei – tos ir ietekmējuši arī citi faktori, kas šajā gadījumā varētu būt sinerģiskais efekts.

Atšķirības vērojamas klasteros ar malu garumiem 40-50 m – CPI Morana I = -0.05, savukārt, NO un NO<sub>2</sub> Morana I = 0.22. Nozīmīgākas atšķirības ir arī klasteru izvietojumā ar malu garumiem 70-90 m, kur CPI Morana I = -0.41 līdz 0.78, savukārt NO, NO<sub>2</sub>, Morana I = -0.61 līdz 0.77.

Šajā pētījumā konstatētā mikroklimata ietekme gaisa piesārņojuma sinerģiskā efektu veidošanā ir relatīvi jauna atziņa – līdzīgos pētījumos parasti apskatīta atsevišķu meteoroloģisku faktoru radītā ietekme (Daniel, et al., 2003; Roberts, 2004). Tomēr mikroklimats un meteoroloģiskie faktori ir divi dažādi

jēdzieni, jo gaisa temperatūra, vēja ātrums un relatīvais gaisa mitrums dažādas pilsētas vietās dēļ “ielu kanjonu” ģeometrijas var izteikti atšķirties no vispārējiem meteoroloģiskajiem apstākļiem konkrētajā vietā (Chen et al., 2010; Idezak et al., 2007; Vardoulakis et al., 2003). Tas arī labi izskaidro pretrunīgos rezultātus no Brīvības un Valdemāra ielās Rīgā, apliecinot, ka sinerģisko efektu veidojošie meteoroloģiskie faktori ir specifiski katrai konkrētajai vietai un, ja vienā gadījumā korelācija netiek konstatēta, tas nenozīmē, ka šo faktoru var izslēgt no sinerģiskā efekta novērtējuma – citā vietā šis faktors var izrādīties ļoti būtisks sinerģisko mijiedarbību veidotājs.

Šajā sinerģiskā efekta novērtējumā iegūtie rezultāti un galvenās atziņas – pārliecinošā CPI korelācija ar piesārņojuma svārstībām  $R = -0.86$  un izteiktā telpiskā autokorelācija Morana  $I = 0.78$  atbilst biežāk lietotai sinerģiskā efekta definīcijai, kas nosaka, ka sinerģisko efektu veido dažādo piesārņojošo vielu vienlaicīga iedarbība (EPA, 1986; Mumtaz & Durkin, 1992; Brouwere et al., 2014). To vēl papildina fakts, ka iegūto sinerģiskā efekta novērtējuma rezultātu – CPI telpiskā autokorelācija atšķiras no gaisa piesārņojuma izkliedes modelēšanas rezultātiem (3.4. att. un 3.5. att.), kas liecina par dažādu faktoru mijiedarbību konkrētu CPI vērtību radīšanā. Līdz ar to var uzskatīt, ka izstrādātais modelis satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanai (3.3. att.) līdzīgi kā sinerģiskā efekta novērtējuma modelis, izmantojot automātiskās mērījumu stacijas (3.1. att.) ir spējīgs darboties un izmantojams praktiskiem mērķiem – satiksmes radītā gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanai ar izkliedes modelēšanas palīdzību.

### **3.3. Liepājā un Rīgā veikto sinerģiskā efekta novērtējumu rezultātu validācija**

Pētījuma laikā gan Liepājā, gan Rīgā konstatēts sinerģiskais efekts sekojošu mijiedarbību veidā:

- Liepājā –  $\text{NO}_x$  un gaisa temperatūru,
- Rīgā –  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  un gaisa temperatūra.

Lai šos rezultātus validētu – pārlicinātos, ka tiešām ir konstatēts minēto faktoru veidots sinerģiskais efekts, veikta parciālās korelācijas analīze.

Šim mērķim visām pētījumu vietām izveidotas 2 atsevišķas korelācijas matricas: viena gaisu piesārņojošām vielām, otra – meteoroloģiskajiem faktoriem. Parciālās korelācijas aprēķināšanā pielietota inversās matricas metode – vispirms izveidota inversā matrica, tālāk ar tās palīdzību izveidota parciālās korelācijas matrica (3.4. – 3.5. tabula).

**CPI parciālā korelācija un tās aprēķināšanai izmantotie dati gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumam Liepājā / *Partial correlation of CPI forming factors in Liepaja***

<b>Pirsona korelācijas koeficients / <i>Pearson's R</i></b>			
	CPI	NO <sub>x</sub>	Temperatūra / <i>Air temperature</i>
CPI	-	-0.47	-0.34
NO <sub>x</sub>	-0.47	-	-0.57
Temperatūra / <i>Air temperature</i>	-0.3404	-0.57	-
<b>Pirsona korelācijas koeficienta inversā matrica / <i>Inverse matrix</i></b>			
	CPI	NO <sub>x</sub>	Temperatūra / <i>Air temperature</i>
CPI	-	4.45	4.07
NO <sub>x</sub>	4.45	-	4.88
Temperatūra / <i>Air temperature</i>	4.07	4.88	-
<b>Parciālas korelācijas koeficients / <i>Partial correlation</i></b>			
	CPI	NO <sub>x</sub>	Temperatūra / <i>Air temperature</i>
CPI	-	-0.86	-0.84
NO <sub>x</sub>	-0.86	-	-0.88
Temperatūra / <i>Air temperature</i>	-0.84	-0.88	-

Liepājā CPI un NO<sub>x</sub> parciālās korelācijas koeficients ir 0.86., savukārt, CPI un gaisa temperatūrai – 0.84. Līdz ar to var teikt, ka pastāv vienlīdz liela varbūtība, ka sinerģisko efektu Liepājā ir veidojuši slāpekļa oksīdi vai gaisa temperatūra (3.4. tabula).

Pašlaik lielākā daļa pierādījumu ir par O<sub>3</sub> un gaisa temperatūras vienlīdzīgu mijiedarbību (Foster et al. 2000; Kahle et al., 2015; Madrigano et al., 2015), tomēr atsevišķos pētījumos ir pierādīta arī mijiedarbība starp gaisa temperatūru un NO<sub>x</sub> (Vanos et al., 2014). Tāpēc var pieņemt, ka gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējuma rezultāti Liepājā ataino sinerģisko efektu, bet iespēju, ka šos rezultātus ir radījusi tikai specifiska bioindikatoru reakcija gaisa temperatūras svārstību ietekmē, pilnībā izslēgt nevar.

Rezultāti no Brīvības ielas salīdzinājumā ar Liepāju uzrada sarežģītāku sinerģisko mijiedarbību – O<sub>3</sub> + NO<sub>x</sub> + temperatūra (3.1. un 3.2. tabula).

3.5. tabula

**CPI parciālā korelācija un tās aprēķināšanai izmantotie dati gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējumam Rīgā Brīvības ielā / *Partial correlation of CPI forming factors in Riga Brivibas Str.***

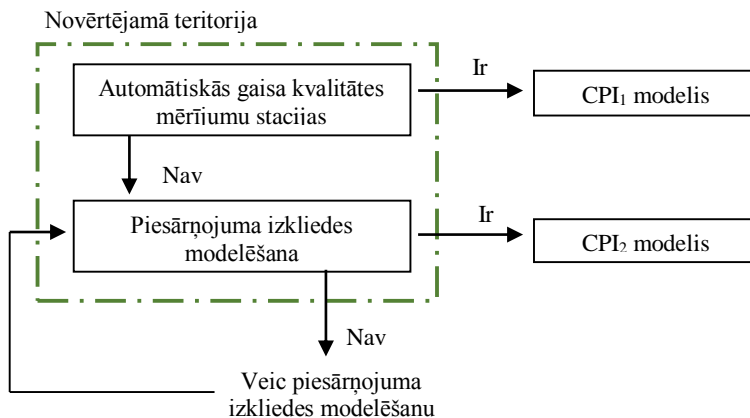
<b>Pirsona korelācijas koeficients / <i>Pearson's R</i></b>				
	CPI	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	Temperatūra / <i>Air temperature</i>
CPI	-	-0.89	-0.91	0.57
NO <sub>x</sub>	-0.89	-	0.68	-0.33
O <sub>3</sub>	-0.91	0.68	-	-0.73
Temperatūra / <i>Air temperature</i>	0.57	-0.33	-0.73	-
<b>Pirsona korelācijas koeficienta inversā matrica / <i>Inverse matrix</i></b>				
	CPI	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	Temperatūra / <i>Air temperature</i>
CPI	-	20.63	24.16	0.77
NO <sub>x</sub>	20.63	-	10.15	-0.35
O <sub>3</sub>	24.16	10.15	-	2.72
Temperatūra / <i>Air temperature</i>	0.77	-0.35	2.72	-
<b>Parciālas korelācijas koeficients / <i>Partial correlation</i></b>				
	CPI	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	Temperatūra / <i>Air temperature</i>
CPI	-	-0.91	-0.88	-0.07
NO <sub>x</sub>	-0.91	-	-0.67	0.06
O <sub>3</sub>	-0.88	-0.67	-	-0.41
Temperatūra / <i>Air temperature</i>	-0.07	0.06	-0.41	-

Rīgā, Brīvības ielā (3.5. tabula), CPI un O<sub>3</sub> parciālās korelācijas koeficients ir 0.88, bet CPI un NO<sub>x</sub> – 0.91, kas norāda uz pārliecinošu šo piesārņotāju ietekmi sinerģiskā efekta veidošanā. Par labu sinerģiskā efekta konstatēšanai liecina fakts, ka izslēdzot vienlaicīgi gan O<sub>3</sub>, gan NO<sub>x</sub> varbūtējo ietekmi, parciālās korelācijas koeficients gaisa temperatūrai ir -0.07.

Tomēr šajā gadījumā jāņem vērā fakts, ka abas sinerģiskā efekta veidošanā iesaistītās piesārņojošās vielas – O<sub>3</sub> un NO<sub>x</sub> ir savstarpēji saistītas, jo ozons tiešā veidā vidē nenonāk – tā avots ir slāpekļa oksīdi, no kuriem tas veidojas dažādu fotoķīmisku reakciju ceļā (Vallero, 2014). Tomēr, no otras puses, ir arguments, ka O<sub>3</sub> un NO<sub>x</sub> iesaiste gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta veidošanā ir zināma no eksperimentāliem pētījumiem laboratorijas apstākļos (Gamon et al., 2014) un arguments, ka parciālās korelācijas ir atšķirīgas – R = 0.67 (O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>) ir mazāk izteikta korelācija kā R = 0.88 (O<sub>3</sub>, CPI) un R = 0.91 (NO<sub>x</sub>, CPI). Tāpēc varbūtība, ka iegūtās CPI vērtības ataino O<sub>3</sub> un NO<sub>x</sub> radītu sinerģisko efektu, ir lielāka.

### 3.4. Izstrādāto sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļu pielietošanas metodika

Gaisa piesārņojuma sinerģisko efektu šajā promocijas darbā aprakstītajā veidā var novērtēt vietās kur ir izvietotas automātiskās gaisa kvalitātes mērījumu stacijas vai ir veikta piesārņojuma izkliedes modelēšana. Piemērotākā novērtējuma varianta izvēles gaita parādīta 3.6. attēlā.



Avots: autora veidots

3.6. att. **Gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļa izvēles gaita / Selection process of the most suitable cumulative pollution evaluation model**

Neatkarīgi no pielietotā modeļa (3.1. vai 3.3. att.), gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtējuma gala rezultāts ir sinerģiskā piesārņojuma indekss CPI. Lai noteiktu atbilstošu riska līmeni var izmantot 3.6. tabulu.

3.6. tabula

**CPI indeksa vērtībām atbilstošo sinerģiskā efekta līmeņu skala / *CPI index scale according to cumulative effect magnitude***

CPI	Piesārņojuma līmeņa atšķirība no mērījamiem vai izklīdes modelēšanas / <i>Difference between actual effect and measurements (%)</i>	Sinerģiskais efekts / <i>Cumulative effect</i>
> 5	100	Ļoti augsts / <i>Very high</i>
2.6 – 5	80	Augsts / <i>High</i>
1.8 – 2.5	60	Vidējs / <i>Average</i>
1.3 – 1.7	40	Zems / <i>Low</i>
1 – 1.2	20	Ļoti zems / <i>Very low</i>
1	0	Sinerģiskais efekts nepastāv / <i>No effect</i>
< 1	-	Rezultāti nav derīgi / <i>Not valid</i>

3.6. tabulas saturs ir tikai rekomendācija CPI vērtību interpretēšanā, jo tā parāda teorētisko CPI vērtību atbilstību dažādiem sinerģiskā efekta radīto draudu līmeņiem, izmantojot atziņas no pētījuma, kas veikts šī promocijas darba izstrādes gaitā. Precīzākas CPI gradācijas izstrādei ir nepieciešami plašāki pētījumi un lielāks datu apjoms, uz kā pamata izdarīt secinājumus par konkrētu CPI vērtību saistību ar konkrētu draudu līmeni.



## 4. SECINĀJUMI

1. Pētījuma gaitā izstrādāts vispārināts gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta novērtēšanas matemātiskais modelis – CPI indekss un uz to balstīti praktiski risinājumi – divi specializēti sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļi: pirmais kā informācijas avotu sinerģiskā efekta noteikšanai izmanto automātiskās gaisa kvalitātes mērījumu stacijas, otrs – piesārņojuma izkliedes modelēšanu.
2. Izstrādāto sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļu sinerģisko efektu raksturojošais CPI indekss Liepājā variēja robežās 1.1 – 1.94 (ļoti zems līdz vidējs), Rīgā no 1.3 – 1.51 (zems).
3. Kā potenciālie sinerģisko efektu veidojošie faktori šī pētījuma ietvaros identificēti slāpekļa oksīdi, ozons un gaisa temperatūra – vērojama izteikta iegūto CPI indeksa vērtību korelācija ar visiem minētajiem faktoriem:  $R = 0.72 - 0.96$  ( $\text{NO}_x$ ),  $R = 0.90$  ( $\text{O}_3$ ) un  $R = 0.61 - 0.58$  gaisa temperatūrai.
4. Gaisa temperatūrai sinerģiskā efekta veidošanā nav bijusi noteicoša loma, tā visticamāk darbojusies kā katalizators: CPI indeksa un gaisa temperatūras parciālās korelācijas koeficients – 0.07
5. Pētījuma laikā pirmo reizi konstatēta pilsētas mikroklimata ietekme sinerģiskā efekta veidošanā – izkliedes modelēšanā balstītā novērtējuma laikā Liepājā konstatēta izteikta rezultātu teritoriālā klasterizācija (Morana  $I = 0.78$ ). Augstākās sinerģiskā efekta vērtības novērotas pilsētas “ielu kanjonos” – CPI indekss 1.65 līdz 1.82, savukārt, zemākā vērtība (CPI 1.36) – plašā un atklātā vietā (Jaunajā ostmalā).
6. Abi izstrādātie sinerģiskā efekta novērtēšanas modeļi savu funkciju pilda vienlīdz labi un ir savstarpēji papildinoši – modelis, kas kā informācijas avotu izmanto automātiskās mērījumu stacijas, ļauj veikt punktveida mērījumus pa atsevišķiem mēnešiem, savukārt, modelis, kas izmanto piesārņojuma izkliedes modelēšanu, ir piemērots ilgtermiņa sinerģiskā efekta novērtēšanai plašā teritorijā.
7. Apstiprinājusies izvirzītā pētījuma hipotēze – gaisa piesārņojuma sinerģiskā efekta gadījumā bioindikācijas rezultāti atšķiras no gaisa kvalitātes mērījumu rezultātiem, un šo abu rezultātu attiecību var izmantot sinerģiskā efekta novērtēšanai.

## 1. BACKGROUND OF THE RESEARCH

Information on air pollution can be obtained with a variety of environmental parameter methods – automated measurements and pollution dispersion modelling. Current solutions fulfil their task – evaluate pollution level in compliance with environmental quality standards. However, recent studies have shown that there is a hidden, less obvious danger – cumulative effect – increased impact on living organisms caused by interactions of different pollutants and environmental factors. For example, ozone mixed with other pollutants, results in greater impact on human health than same substances in a separate action (Mauderly and Samet, 2009). Such interactions are very complex and depends on a combination of many factors – weather, air temperature, humidity, exposure, etc. (Stylianou and Nicolich, 2009; Su et al., 2012), hence they are not easy to assess.

Air pollution cumulative effect assessment methodologies are hindered by a lack of verified analytical framework (Callahan and Sexton, 2007) – cumulative effect most often is viewed only in a simplest form of interactions and mostly in laboratory conditions (Meek et al., 2011; Monosson, 2005). Therefore, with current knowledge on interactions between pollutants, environmental parameter methods alone cannot serve as an effective tool for cumulative pollution assessment.

As an alternative bioindication can be used – pollution level determination by its impact on certain living organisms. It can't determine exact concentrations of substances, like with air quality measurements, but it is an effective tool to evaluate how much pollution caused damage living organism take in given pollution level (Tiwari, 2008; Conti and Cecchetti, 2001). However, also bioindication alone cannot be used as an effective cumulative effect assessment tool, because it is impossible to determine whether the damage to indicator organisms are caused by individual pollutants or the cause is cumulative effect.

In the case of cumulative impact, living organisms should receive more damage than it should be in measured pollution level. Therefore, by using chemical substances concentration measurements and bioindication together, would be possible to extract information about this extra damage from air quality measurement data, allowing to detect and evaluate cumulative effects more effectively than with current – statistical models based approaches.

Such integrated cumulative effect evaluation solution could significantly improve efficiency of air quality monitoring, because in addition to the existing measurements, also cumulative effect can be detected and evaluated.

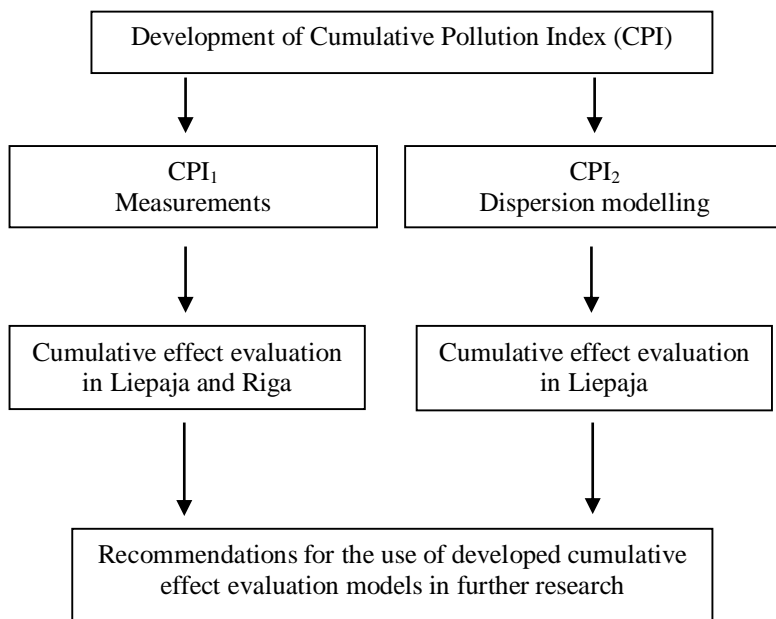
## 1.1. Goal and tasks of the thesis

The objective of the doctoral thesis is to develop a cumulative effect evaluation model based in bioindication and environmental parameter methods and verify it by doing cumulative effect evaluation in Liepaja and Riga.

Scientific tasks set to reach the goal of the thesis are:

1. Characterize air pollution and its assessment problematics;
2. Develop air pollution cumulative effect evaluation model based in bioindication and environmental parameter method;
3. Verify developed model and assess its practical application by doing air pollution cumulative effect evaluation in Liepaja and Riga.

## 1.2. Structure of the thesis



### 1.3. Scientific novelty and practical value of the research

- For the first time in Latvia air pollution cumulative effect evaluation was done. During the research such factors as air temperature, humidity and cumulative effect caused microclimate of "street canyons" were evaluated.
- During the study a new approach in cumulative effect evaluation was used – bioindication and air quality measurements merged into a single integrated solution.
- Universal cumulative pollution evaluation method was developed – Cumulative Pollution Index (CPI)
- Based on the CPI method, two specialized air pollution cumulative effect evaluation models were developed – one for automatic air quality measurement stations, and the other – for pollution dispersion modelling.

### 1.4. Approbation of the results

The results of the thesis are published in three scientific articles:

Kalniņš, V. Cumulative air pollution evaluation model in air quality monitoring: merging bioindication and pollution measurements. *Pollution Research*. 2015, vol. 34, pp. 21-29. (SCOPUS)

Kalniņš, V. Cumulative Impact Evaluation In Central Part of Liepaja with Cumulative Pollution Index Method and Air Pollution Dispersion Modelling. *Proceedings of the Latvia University of Agriculture*. 2015, vol. 33, pp. 2-7.

Kalniņš, V. Bioindication based cumulative effect evaluation for air pollution monitoring in cases when monitored pollutant values do not exceed breakpoint values. *Innovations and Technologies News*, 2012, vol. 2, pp. 3-10.

Four proceedings of conferences:

Kalniņš, V., Straupe I., Sudārs, R. Evaluation of cumulative air pollution in Riga and Liepaja with Cumulative Pollution Index method. *Research for Rural Development 2014, Annual 20th International Scientific Conference Proceedings*. 2014, vol. 2, pp. 127-132. (SCOPUS)

Kalniņš, V. Bioindication solutions integration in air quality reporting systems. *Liepājas Universitātes 16. starptautiskās zinātniskās konferences rakstu krājums*. 2014, pp. 407-413.

Kalniņš, V. Citizen science approach in bioindication based air pollution monitoring. *Liepājas Universitātes 15. starptautiskās zinātniskās konferences rakstu krājums*. 2013, pp. 458-464.

Kalniņš V. 2012. Assessment of Bioindication Methods in Air Pollution monitoring. *Research for Rural Development 2012” Annual 18th International Scientific Conference Proceedings*. 2012, vol. 2, pp. 117-121. (SCOPUS)

The results are presented in six scientific conferences:

Kalniņš, V. Evaluation of cumulative air pollution impact in Liepāja. Liepājas Universitātes 17. starptautiskā zinātniskā konference. Liepāja, Latvija, 22. – 23. maijs, 2014. Stenda referāts.

Kalniņš, V., Straupe I., Sudārs, R. Evaluation of cumulative air pollution in Riga and Liepāja with Cumulative Pollution Index method. *Research for Rural Development 2014, Annual 20th International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 21 – 32 May, 2014.

Kalniņš, V. Bioindication solutions integration in air quality reporting systems. Liepājas Universitātes 16. starptautiskā zinātniskā konference. Liepāja, Latvija, 23. – 24. maijs, 2013.

Kalniņš, V. Citizen science approach in bioindication based air pollution monitoring. Liepājas Universitātes 15. starptautiskā zinātniskā konference. Liepāja, Latvija, 17. – 18. maijs, 2012.

Kalniņš V. Assessment of Bioindication Methods in Air Pollution monitoring. *Research for Rural Development 2012” Annual 18th International Scientific Conference*. Jelgava, Latvia, 16 – 18 May, 2012.

Kalniņš, V. Bioindikācijā balstīta gaisa piesārņojuma monitoringa tīklu plānošana un kumulatīvā efekta novērtēšana. Latvijas Universitātes 71. konference. Rīga, Latvija, 30. janvārī, 2013.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Air pollution cumulative effect evaluation with automated measurement stations in Liepaja and Riga

#### 2.1.1. Cumulative effect evaluation process

In Riga, for air pollution cumulative effect evaluation, central district was used. The choice was made on a basis of the year 2008 pollution dispersion modelling, done by Riga City Council Housing and Environment Department. It shows that the highest concentrations of air pollution are in this place (Riga City Council, 2011). As the research sites in Riga following automated measurements station were used:

- Brivibas Street 73
- Kr. Valdemara Street 18

Research location in Liepaja – Kalpaka Street 34 was chosen due to data availability, because this measurement station is the only one in Liepaja (LVĢMC, 2011).

Air pollution cumulative effect was expressed in the form of equation Nr.1. To calculate value M in equation Nr.1 air pollution measurement data were obtained on a monthly basis during the period 02.01.2013. – 01.01.2014. Following pollutants were used:

- Riga, Brivibas Street 73 – SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>;
- Riga, Kr. Valdemara Street 18 – NO<sub>x</sub>, NO, O<sub>3</sub>, CO;
- Liepaja – SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, CO.

To calculate value B, at the same time as air pollution measurements, bioindication research was done – transparent, perforated plastic containers with lichen samples were placed on each monitoring station used in cumulative effect evaluation. Three lichen species were used – *Xanthoria parietina* (L.), *Parmelia sulcata* (Taylor) and *Ramalina fraxinea* (L.).

These species was chosen from different sensitivity groups to exclude specific sensitivity to individual pollutants and environmental factors:

- *Ramalina fraxinea* (L.) – sensitive to almost all pollutants (Nimis et al., 2002);
- *Parmelia sulcata* (Taylor) – medium sensitive to SO<sub>2</sub> (Hawksworth and Rose 1970; Peterson et al. 1992), sensitive to other pollutants, including O<sub>3</sub> (Ross & Nash 1983; Ryan 1990; Peterson et al. 1992);
- *Xanthoria parietina* (L.) – resistant specie, affected only by high pollution levels (Hawksworth and Rose 1970; Perkins & Millar 1987b).

Sampling site was located in Liepaja – in suburban forest, near the ruins of Southern fortification of Liepaja (coordinates: 56, 284841; 21, 000106). The choice of this location was based on last available air pollution dispersion modelling which shows that air in this place is relatively clear – outside of all pollution zones of Liepaja (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2004).

Each month, during the period 02.01.2013. – 01.01.2014., 4 cm large lichen samples were collected from all species used in this research and placed in airtight plastic containers and delivered to the cumulative effect evaluation sites. This was done to prevent contamination during the transport.

After placement on the measurement stations, lichen samples were left there for one calendar month, then removed, placed in airtight containers again, and delivered to Latvia University of Agriculture, Agrochemical Soil Analysis Laboratory where chlorophyll/pheophytin ratio analysis was done.

### **2.1.2. Methodology of data processing**

As pollution impact on lichens can be determined by chlorophyll and pheophytin ratio (Tretiach et al., 2007; Riddell et al., 2012). In the laboratory these biochemical values were measured with spectrophotometer according to Ronen and Galun method (1984).

For extraction of both necessary pigments, lichens were placed in Dimethylsulphoxide (DMSO) and heated at a temperature of 65°C for 45 minutes. Then cooled, placed in a spectrophotometer, and measured chlorophyll/pheophytin ratio characterizing optical densities – 415 and 435 nm wavelengths (Ronen & Galun, 1984). To ensure that all obtained optical densities are comparable and heavier lichens with more pigment content has no impact on results, before pigment extraction, all samples were weighted and same amount of DMSO used – 5 ml. Finally, each optical density was expressed against one unit of mass (OD/g).

All obtained results – were compiled in Microsoft Excel table according to lichen species, calendar month and air quality measurement station where the specific sample was placed.

## **2.2. Air pollution cumulative effect evaluation in Liepaja with, pollution dispersion modelling**

In Liepaja, for air pollution cumulative effect evaluation with dispersion modelling the central part of Liepaja was used.

The choice was based on data availability – on this site both types of necessary data for cumulative effect calculation was available – dispersion

modelling (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007) and bioindication study (Kalniņš, 2009).

The study area is bordered by Jauna ostmala (N), Ganibu Street (E), Kungu Street (S) and Liela Street (W) – Fig. 2.1. In this area 12 points were selected according to bioindication data availability. The locations, coordinates and spatial distribution of these points are shown in Table 2.1. and Fig. 2.1.

Cumulative effect was expressed in the form of equation Nr.2. To calculate value D in equation Nr.2, year 2007 pollution dispersion modelling data were used. This modelling was done by SIA Estonian, Latvian & Lithuanian Environment on contract by the Municipality of Liepaja with ADMS Roads 2.2 model. It shows dispersion of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), because, according to modelling survey authors, traffic is the only significant pollution source in the central part of Liepaja and NO<sub>x</sub> takes the largest part in composition of car exhaust gases (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007). To calculate value B in equation Nr.2, accounting of lichen flora in Liepaja was used – collected in the same year as dispersion modelling for preparation of bachelor thesis (Kalniņš, 2009).

### **2.3. Used statistical analysis methods**

As a statistical methods correlation analysis (Pearson's R), partial correlation and One-way ANOVA were used. The calculation of correlation (given as coefficient of multiple correlation in MS Excel) and One-way ANOVA was done by the use of Microsoft Excel built-in tools. Partial correlation was calculated with inverse matrix method.

Since the results of cumulative effect evaluation with pollution dispersion modelling consists of CPI values and their spatial distribution, to determine if there are any spatial patterns in cumulative effect detections, spatial autocorrelation in form of Moran's I index was used (Moran, 1950) expressed in scale -1 to +1 where:

- -1 to 0 – negative autocorrelation;
- 0 to +1 – positive autocorrelation;
- 0 – no autocorrelation.

Moran's I was calculated by the use of online tool, developed by University of Tartu for statistical analysis of spatial data, available at: <http://digiarhiiv.ut.ee/kalkulaator/>

Calculation parameters are shown in Table 2.2.



### 3. RESULTS AND DISCUSION

#### 3.1. Air pollution cumulative effect evaluation with automated measurement stations in Liepaja and Riga

##### 3.1.1. Development of cumulative effect evaluation model

As an examples in cumulative effect evaluation model development, two in world practice popular methods were used – Air Quality Index (AQI) and Index of Atmospheric Purity (IAP). Their equations respectively were placed in equation Nr.1. – AQI as value M and IAP as value B. The result is equation Nr.3

Although equation Nr.3 in given form can be used to calculate cumulative effect, the approach used is too generalized, so it was transformed further to make it compatible with chlorophyll/pheophytin ratio method. The result is equation Nr.4 (Kalniņš et al., 2014).

Based on equation Nr.4, model for air pollution cumulative effect evaluation with automated measurement stations was developed – Fig. 3.1.

##### 3.1.2. Results of cumulative effect evaluation

In cumulative effect evaluation in Liepaja and Riga with developed model (Fig. 3.1.) chlrophyll/pheophytin ratio data were used together with air quality measurements done by same measurement station where lichen samples were placed. Results are compiled in Fig. 3.2.

According to Fig 3.2., in both cities – Liepaja and Riga, air pollution cumulative effect was detected. In Liepaja air quality monitoring site it was detected all year long, except April. While in Riga, only in summer – June to October (Brivibas Str.) and some autumn months – November to December (Kr. Valdemara Str).

Based on previous research on cumulative effects by other authors, following possible cumulative effect forming factors were evaluated:

- Pollutants (Mauderly and Samet, 2009; Bell et al., 2011; Stylianou and Nicolich, 2009; Su et al., 2012);
- Pollutants in combination with meteorological factors – air temperature and humidity (Daniel, et al., 2003; Roberts, 2004).

One-way ANOVA show that in all research sites significant impact on cumulative effect measurement results are both groups – pollutants and meteorological factors ( $F_{\text{fact.}} < F_{\text{crit.}}$ ,  $\alpha = 0.05$ ).

In Liepaja significant impact on CPI is  $\text{NO}_x$  ( $R = 0.72$ ), while in Riga Brivibas Street –  $\text{O}_3$  ( $R = 0.90$ ) and  $\text{NO}_x$  ( $R = 0.96$ ) – Table 3.1.

Despite the CPI correlation with other pollutants, for example, SO<sub>2</sub> in Liepaja (R = 0.54) and O<sub>3</sub> in Kr. Valdemara Str. (R = 0.68), these results are below level of significance ( $p > 0.05$ ).

However,  $p > 0.05$  not necessarily means that data are not valid – one of the most widespread explanations in such cases is small sample size (du Prel, et al., 2009; Gail & Feinn, 2012; Lew, 2012), but in same time results with  $p > 0.05$  can't be interpreted as statistically justified cumulative effect detections.

Taking into account only pollutants, statistically justified cumulative effect detection is only in Riga, Brivibas Street, because R = 0.72 for NO<sub>x</sub> alone in Liepaja don't meet the definition of cumulative effect – synergy of multiple pollutants. Analysis of meteorological factors impact on CPI values – Table 3.6., shows significant CPI correlation with air temperature in Liepaja (R = 0.61). Also, in Riga, Brivibas Street CPI correlates with changes in ambient air temperature, but to a lesser extent than in Liepaja (R = 0.58). Completely different results are from the second site in Riga – Kr. Valdemara Street. In this place, significant correlation is only with relative humidity ( $r = 0.78$ ). If there is any air temperature impact on CPI, it is insignificant (R = 0.37). In addition, these results aren't statistically significant ( $p > 0.05$ ). Therefore, it can be concluded that in forming of CPI values the main meteorological factor was air temperature.

NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> cumulative synergy is well known from various research done by other authors (Gelzleichter et al., 1992; O'Neil et al., 1995). Humans and animals inhale both of these pollutants and they come in contact with respiratory tract lining fluids (RTFLs). Antioxidants in RTFLs reacts with NO<sub>x</sub> and reduces respiratory tissue protection capabilities from oxidants like O<sub>3</sub> (Gamon et al., 2014). NO<sub>x</sub> and O<sub>3</sub> synergy also occurs in biochemical level in the form of damage of various protein structures. Therefore, affecting not only humans and animals, but almost all living organisms (Gamon et al., 2014). Also temperature as a catalyser factor in forming of pollution impact is known from other research – for example, it is known that O<sub>3</sub> causes respiratory dysfunctions in 21–23°C temperature diapason (Horstman et al., 1990; Adams 2003, Adams, 2006) and further increase in temperature results in even greater O<sub>3</sub> impact (Gong et al., 1986; Foster et al., 2000).

Since the cumulative effect evaluation results in Liepaja and Riga can be justified by similar studies done by other authors, it can be assumed that during the study in Liepaja and Riga air pollution cumulative effect was detected and developed cumulative pollution evaluation model (Fig. 3.1.) is valid and can be used for practical purposes – cumulative effect measurements in air quality monitoring.

## **3.2. Air pollution cumulative effect evaluation in Liepaja with, pollution dispersion modelling**

### **3.2.1. Development of cumulative effect evaluation model**

As shown in equation Nr.2, calculation of cumulative effect requires two types of input data – concentration of pollutants and bioindication results, obtained in the same place where pollution measurements were done. Pollution concentrations can be obtained by the use of dispersion modelling, therefore only acquisition of bioindication data remains. To do this, it is necessary to assess bioindicators over a wide area, so the most appropriate in this case are passive (lichen diversity assessment) techniques, such as IAP – one of the most popular bioindication methods (Falla et al. , 2000; Nimis et al., 2002). Merging IAP with previously developed CPI equation for cumulative effect evaluation with automated measurement stations (equation Nr.4), the result is equation Nr.5 (Kalniņš, 2015b).

Based on equation Nr.5 air pollution cumulative effect evaluation model with pollution dispersion modelling was developed – Fig. 3.3.

To start cumulative effect evaluation process, two sets of data are needed – bioindication survey results with IAP method which consist of coordinates and according index values and pollution dispersion modelling results in form of POSTFILE describing same area as bioindication survey. In first step bioindication survey coordinates (X,Y b) are compared with X,Y columns in POSTFILE (X,Y p) to find nearest values, which are marketed as cumulative pollution evaluation coordinates (X,Y CPI).

In second step POSTFILE is searched for X,Y CPI according values in the AVE CONC column. This part is repeated for all pollutants used in specific dispersion modelling. Results, including breakpoint values for each pollutant, together with bioindication survey results – IAP value and IAP control value, are used to calculate CPI index.

### **3.2.2. Results of cumulative effect evaluation**

In air pollution cumulative effect evaluation in central part of Liepaja, developed evaluation model – Fig. 3.3. and following data were used:

- NO and NO<sub>2</sub> (NO<sub>X</sub>) year average modelled concentration (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment, 2007),
- Lichen species and their coverage accounting in Liepaja (Kalniņš, 2009).

According to the obtained results (Table 3.3.), cumulative impact in the central part of Liepaja is relatively high – CPI vary in interval 1.36 to 1.94

High cumulative impact is observed throughout the entire length of Liela Street (1.8-1.94) while elsewhere in the central part of Liepaja CPI values are almost identical – 1.64, 1.65, 1.67, except Baznicas and Ganibu Street crossing, where cumulative impact is almost as high as in Liela Street – 1.81 (Table 3.3.). The minimum of cumulative impact is in Jauna Ostmala (1.36) – a wide, open place, near the Tirdzniecibas Channel, while the maximum is in Rozu Square, where CPI value is 1.94 (Table 3.3.). There is a strong negative correlation between modelled pollution level and obtained CPI values ( $r = -0.86$ ) which means that high pollution scores go with low CPI scores and contrary. Therefore, is possible to make an assumption that in many points in Liepaja the results of this study show not the “real impact” on living organism caused by cumulative effect, but the “real impact” due to non-compliance of dispersion modelling results and actual pollution level.

Fact that pollution modelling results often differs from real life situation is known from many studies (Hirtl & Baumann-Stanzer, 2007; Air Quality Modelling Review Steering Group, Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2011). It can explain, why in some places pollution level is low while CPI values are high, for example – Rozu Square, but there are also places where the situation is completely opposite – in Jauna Ostmala the results of dispersion modelling show high pollution ( $25-30 \mu\text{g m}^{-3}$ ), while CPI values there is the lowest in the whole central part of Liepaja – 1.36.

Examining the spatial distribution of cumulative impact (Fig. 3.4.) strong clustering of CPI values were observed (Moran's  $I = 0.78$ ). It means, that there is a pattern in cumulative effect spatial distribution. Taking into account the latest research on city microclimate, it is possible to assume that one of the main factors that cause cumulative effect variations in the central part of Liepaja is microclimate differences due to geometry of street canyons. Microclimate and street canyon geometry impact on air temperature and humidity is demonstrated by a number of studies (Vardoulakis et al., 2003; Idezak et al., 2007; Chen et al., 2010) – tall building cause permanent shadow, thus inhibiting evaporation. They also hold wind, reducing air exchange. Concrete, masonry and asphalt surfaces accumulate heat and ambient air temperature rises due to temperature of car exhaust gases, etc.

This can explain why the highest CPI values (1.82-19.4) are in Liela Street which is surrounded by high stone and concrete buildings, while the lowest cumulative impact is in wide and open space – Jauna Ostmala (CPI 1.36).

To make sure that the results of CPI spatial autocorrelation analysis show cumulative effect, not air pollution dispersion, SIA Estonian, Latvian & Lithuanian Environment modelling results were analysed in same way – by the use of spatial autocorrelation method.

Both curves (Fig. 3.4. and Fig. 3.5.) are similar in specific points, but significantly different in general. This points to the fact that the cause of CPI spatial distribution is not identical to NO, NO<sub>2</sub> dispersion – it is also affected by other factors that in this case could be cumulative effect.

The role of microclimate in forming of air pollution cumulative effect is relatively new fact – in similar studies individual meteorological factors are typically evaluated (Daniel et al., 2003; Roberts, 2004). This can explain conflicting results from two parallel streets in Riga – Brīvības and Kr. Valdemāra Street, because cumulative effect forming meteorological factors can be specific to each particular location and if in one case correlation isn't found it doesn't mean that those factors may be excluded from cumulative effect evaluation in another places.

As the results obtained with CPI model correlate with air pollution level ( $r = -0.86$ ) and shows strong spatial autocorrelation – Moran's  $I = 0.78$ , they corresponds to the most commonly used definition of cumulative effect, which states that cumulative effect is impact of various pollutants in simultaneous action (EPA, 1986; Mumtaz & Durkin, 1992; Brouwers et al. 2014).

Therefore, can be concluded that developed cumulative effect evaluation model (Fig. 3.3.) is valid and can be used for practical purposes – cumulative effect assessment with air pollution dispersion modelling.

### **3.3. Validation of cumulative effect evaluation results in Liepaja and Riga**

During the study in Liepaja and Riga, cumulative effect was detected in following forms of interactions:

- Liepaja – NO<sub>x</sub> and air temperature,
- Riga – NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> and air temperature.

To validate these results, partial correlation analysis was done.

For this purpose, two separate correlation matrix – one for air pollutants, the other for meteorological factors were created – Table 3.4. – 3.5.

In Liepaja CPI and NO<sub>x</sub> partial correlation coefficient is 0.86, while coefficient for CPI and air temperature – 0.84. Therefore, it can be said that there is an equally high probability that air pollution cumulative effect in Liepaja was formed by either nitrogen oxides or air temperature (Table 3.4.).

Currently most of the evidence is on O<sub>3</sub> and temperature interactions (Foster et al. 2000; Kahle et al., 2015; Madrigano et al., 2015), but some studies have shown interactions between temperature and NO<sub>x</sub> (Vanos et al., 2014). Therefore, it can be assumed that the air pollution cumulative effect evaluation results in Liepaja shows cumulative effect, but the possibility that these results are only a specific reaction to air temperature fluctuations cannot be completely ruled out.

Results from Brivibas Street in Riga, in comparison with results from Liepaja, shows more complex cumulative interaction – O<sub>3</sub> + NO<sub>x</sub> + air temperature (Table 3.1. – 3.2.).

In Riga (Table 3.5.) CPI and O<sub>3</sub> partial correlation coefficient is 0.88, but CPI and NO<sub>x</sub> – 0.91. It is important that excluding both O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub>, partial correlation of air temperature doesn't exist (coefficient = -0.07).

However, in this case both cumulative effect forming pollutants – O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> are interrelated – ozone in atmosphere is formed in photochemical reactions, also from nitrogen oxides (Vallero, 2014). However, on the other hand, there is an argument that O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> involvement in cumulative effect is known from experimental studies in laboratory conditions (Gamon et al., 2014) and an argument that the partial correlations are different (Table 3.4. – 3.5.).

Therefore, the probability that the obtained CPI values shows O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> cumulative effect is more convincing.

### **3.4. Methodology for the use of developed cumulative effect evaluation models**

Air pollution cumulative effect in the way described in this doctoral thesis can be evaluated if either automatic air quality measuring stations or pollution dispersion modelling is available.

How to choose the most suitable one of the both developed models are shown in Fig. 3.6.

Regardless of the chosen cumulative effect evaluation model (Fig. 3.1. or Fig. 3.3.), the result is Cumulative Pollution Index – CPI. In order to determine the level of risk associated with specific CPI value, Table 3.6. can be used. However, the content of Table 3.6. is only a recommendation – it is a theoretical interpretation of CPI. For development of more accurate gradation additional and larger scale research is needed.

## 4. CONCLUSIONS

1. During the research generalized air pollution cumulative effect evaluation mathematical model – CPI index and two specialized cumulative effect evaluation models were developed. In the first model as data source automatic air quality measurement stations are used, in the second - pollution dispersion modelling is used.
2. Application of developed models shows that in Liepaja cumulative effect characterizing CPI index ranged within 1.1 – 1.94 (very low to medium), while in Riga from 1.3 to 1.51 (low).
3. As a potential cumulative effect forming factors, nitrogen oxides, ozone and air temperature were identified – CPI index correlates with all of these factors:  $R = 0.72 - 0.96$  ( $\text{NO}_x$ ),  $R = 0.90$  ( $\text{O}_3$ ) and  $R = 0.61 - 0.58$  (air temperature).
4. Air temperature is not the main cumulative effect forming factor – it most likely have acted as a catalyst: partial correlation of CPI index and temperature is  $-0.07$ .
5. During the study, for the first time, the role of microclimate in forming of cumulative effect was noted – dispersion modelling based assessment in Liepaja shows significant spatial clustering of cumulative effect (Moran's  $I = 0.78$ ). Higher values were observed in the "street canyons" – CPI 1.65 to 1.82, while the lowest value (CPI 1.36) in a wide and open area (Jauna Ostmala).
6. Both developed cumulative effect evaluation models works equally well and complement each other.
7. The hypothesis was confirmed – bioindication results in a case of air pollution cumulative effect differs from measurement results and this difference can be used to detect and evaluate cumulative effect.

## GALVENO IZMANTOTO AVOTU SARAKSTS / BIBLIOGRAPHY

1. Callahan, M.A., Sexton, K. If cumulative risk assessment is the answer, what is the question? *Environmental Health Perspectives*. 2007, vol. 115, pp. 799-806.
2. Conti, M.E., Cecchetti, G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment: a review. *Environmental Pollution*. 2001, vol. 114, pp. 471-492.
3. Falla, J., Gilly, P.L., Henryson, M., Morlot, D., Ferard, J.F. Biological Air Quality Monitoring: A Review. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2000, vol. 64, pp. 627-644.
4. Gamon, L.F., White, J. M., U., Wille. Oxidative damage of aromatic dipeptides by the environmental oxidants NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. *Organic & Biomolecular Chemistry*. 2014. vol. 41, pp.
5. Mauderly, J.L., Samet, J.M. Is there evidence for synergy among air pollutants in causing health effects? *Environmental Health Perspectives*. 2009, vol. 117, pp. 1-6.
6. Meek, M.E., Boobis, A.R., Crofton, K.M., Heinemeyer, G., Raaij, M.V., Vickers, C. Risk assessment of combined exposure to multiple chemicals: a WHO/IPCS framework. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2011, vol. 60, pp. 1-14.
7. Monosson, E. Chemical mixtures: Considering the evolution of toxicology and chemical assessment. *Environmental Health Perspectives*. 2005, vol. 113, pp. 383-390.
8. Nimis, P.L., Scheidegger, C. and Wolseley, P.A. *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens: NATO science series IV: Earth and Environmental Sciences*. vol. 7, London: Springer, 2002. 408 pp. ISBN 978-94-010-0423-7
9. Roberts, S. Interactions between particulate air pollution and temperature in air pollution mortality time series studies. *Environmental Research*. 2004, vol. 96, pp. 328-337.
10. Stylianou, M., Nicolich, M.J. Cumulative effects and threshold levels in air pollution mortality: Data analysis of nine large US cities using the NMMAPS dataset. *Environmental Pollution*. 2009, vol. 157, pp. 2216-2223.
11. Tiwari, G.B.G.P.K. Lichens as an indicator for Air Pollution: A Review. *Indian Journal of Air Pollution Control*. 2008, vol. 8, pp. 8-17.