



17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

FUNDAMENTALIOS DIAGRAMOS TRANSPORTO SRAUTŲ MODELIUOSE

Algimantas Danilevičius¹, Raimundas Junevičius²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹Algimantas.Danilevicius@vgtu.lt; ²Raimundas.Junevicius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjama fundamentaliųjų diagramų metodų taikymas transporto srautų modeliuose. Naudojant „Traffic counter TC25“ mikrobangų transporto priemonių srauto skaitiklį išmatuojamos pasirinktos gatvės transporto parametrų vertės. Duomenys apdorojami programiniu paketu „Matlab“. Gautų duomenų sklaida aproksimuojama mažiausių kvadratų metodu ir gautos regresijos lygtys, naudojamos matematinių modelių lygčių vertėms apskaičiuoti. Siūlomas metodas leidžia nesudėtingai parinkti parametrus transporto srautų modeliams ir susieti matematinius modelius su realiai tiriamomis gatvėmis.

Reikšminiai žodžiai: fundamentali diagrama, Matlab, mažiausių kvadratų metodas, transporto srautas.

Įvadas

Kiekvienais metais transporto priemonių skaičius gatvėse auga. Tai lemia transporto spūsčių susidarymą. Ištyrus ir įvertinus gatvių transporto srautų parametrus, galima gauti teorinių transporto srautų modelių kintamųjų reikšmes ir taip teorinius modelius susieti su konkrečiomis gatvėmis. Tikslėnis ir labiau realias sąlygas atitinkantis modelis leistų sumažinti ar visiškai panaikinti transporto spūstis ir dėl to trumpėtų automobilių prastovos gatvėse, mažėtų išmetamų deginių kiekių ir triukšmas.

Autorių Mauro *et al.* (2013) atlikti tyrimai leidžia prognozuoti autostrados eismo srautų patikimumą, modeliuojant transporto priemonių greitį priklausomai nuo jų koncentracijos kelyje. Taip pat autoriai Sarasua *et al.* (2006) tyrė ryšį tarp greičio, koncentracijos, intensyvumo ir laiko, naudojant tiesinę priklausomybę tarp koncentracijos ir greičio.

Šiame straipsnyje pateikiamas metodas fundamentaliuosios diagramos reikšmėms nustatyti naudojant išmatuotą transporto srauto reikšmę.

Fundamentaliųjų transporto diagramų metodų apžvalga

Taikoma daug metodų, kuriais galima modeliuoti transporto priemonių greitį, intensyvumą ir koncentraciją gatvėse. Tačiau ne kiekvienas iš jų tinka konkrečių gatvių eismui esant įvairioms sąlygoms modeliuoti.

Erlingsson *et al.* (2006) konferencijos pranešime pateikiamas Greenshield metodas, kuriuo teigiama, kad

linijinė greičio–koncentracijos priklausomybė paprastai užrašoma taip:

$$v(k) = v_{\max} \left(1 - \frac{k}{k_{\max}} \right), \quad (1)$$

čia $v(k)$ – transporto srauto greičio funkcija priklausanti nuo koncentracijos k – koncentracija; k_{\max} – max galima koncentracija; v_{\max} – max srauto greitis.

Todėl intensyvumo ir greičio priklausomybė tampa parabolės formos:

$$q = v(k) \cdot k = v_{\max} \left(1 - \frac{k}{k_{\max}} \right) k = v_{\max} \left(k - \frac{k^2}{k_{\max}} \right), \quad (2)$$

čia v – transporto priemonės greitis.

Erlingsson *et al.* (2006) konferencijos pranešime taip pat pateikiamas keturių parametrų Van Aerde modelis. Šį modelį taip pat naudojo Brinol (2011) straipsnyje, siekdamas nustatyti priklausomybę tarp greičio ir koncentracijos. Norėdami naudoti Van Aerde modelį, pirmiausiai turime įvertinti keturis parametrus: c_1 , c_2 , c_3 ir k . Šie parametrai yra susiję su esamu greičiu v_f , optimaliu greičiu v_0 , kelio talpumu q_m ir esama spūsties koncentracija k_{\max} . Šie parametrai pateikiami kaip:

$$c_1 = mc_2, \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{1}{k_{\max} \left(m + \frac{1}{m_f} \right)}, \quad (4)$$

$$c_3 = \frac{-c_1 + \frac{v_0}{q_m} - \frac{c_2}{v_f - v_0}}{v_0}, \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_f - v} + c_3 v}, \quad (6)$$

čia c_1 – pastovus atstumas iki priekyje esančios transporto priemonės, km; c_2 – pirmasis pastoviu pagreičiu kintantis atstumas iki priekyje esančios transporto priemonės, km^2/h ; c_3 – antrasis pastovus atstumo kitimas, h; m – konstanta naudojama išspręsti trims judėjimo greičio konstantoms, h/km; k – koncentracija.

Konstanta m skaičiuojama taip:

$$m = \frac{2v_0 - v_f}{(v_f - v_0)^2}. \quad (7)$$

Van Aerde modeliu transporto priemonių intensyvumas užrašomas:

$$q = \frac{v}{c_1 + \frac{c_2}{v_f - v} + c_3 v}. \quad (8)$$

Lu *et al.* (2009) straipsnyje pateikiamas Edie (1961) metodas, kuris patobulino Greenberg (1959) metodą, kurio trūkumas buvo tas, kad nebuvo galima jo taikyti esant retam srautui. Šis metodas taip pat analizuojamas Leclercq *et al.* (2014) straipsnyje, kuriame jis palyginamas su kitais metodais.

$$v(k) = \begin{cases} \exp\left(-w_1 \frac{k}{k_{\max}} + w_2\right), & k \leq k_{\max}, \\ g_1 + g_2 \ln\left(\frac{k}{k_{\max}}\right), & k > k_{\max}, \end{cases} \quad (9)$$

čia w_1 , w_2 ir g_1 , g_2 – parametrai duomenų pritaikymo lankstumui.

Transporto srauto greičio funkcija priklausanti nuo koncentracijos, išreikšta Edie metodu, leidžia apskaičiuoti transporto srauto greitį, tiek esant transporto priemonių koncentracijai mažesnei arba lygiai už maksimaliai galiama, tiek ir esant didesnei transporto priemonių koncentracijai kelyje.

Duomenų sklaidos aproksimavimo metodai

Zhang *et al.* (2014) straipsnyje pateiktas mažiausių kvadratų metodas, suminis mažiausių kvadratų metodas ir adaptyvus suminis mažiausių kvadratų metodas. Jie buvo aprašyti ir spęsti su išmatuotais duomenimis, „užterštais“

atsitiktinių paklaidų. Mažiausių kvadratų metodas eismo srautų modeliuose taip pat buvo panaudotas Wang *et al.* (2011) straipsnyje.

Mažiausių kvadratų (MK) metodas. Mažiausių kvadratų metode, tikslo funkcija yra:

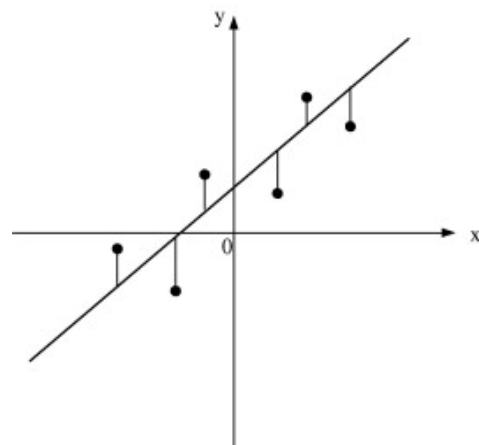
$$u(x) = \sum_{i=1}^m p_i(x) a_i(x) = p^T(x) a(x), \quad (10)$$

čia $p_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, m$ yra vienanarė bazinė funkcija, m yra sąlygų skaičius bazinėje funkcijoje, ir $a_i(x)$ yra bazinės funkcijos koeficientai.

X įtakos srityje, įprastai naudojamas mažiausių kvadratų metodas vietos suderinimui. Kai pagrindinė funkcija $p_i(x)$, $i = 1, 2, \dots, m$, yra tiesinė:

$$J(a, b) = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) (ax_i + b - y_i)^2. \quad (11)$$

Įprastas mažiausių kvadratų metodas tik sumažina atstumo, pakelto kvadratu, svertinę sumą neatsižvelgiant į nepriklausomų kintamųjų sklaidą (1 pav.). Čia duomenų sklaida suderinama tik vertikalia kryptimi.



1 pav. Vietos derinimas mažiausių kvadratų metodu pagal Zhang *et al.* (2014)

Suminis mažiausių kvadratų (SMK) metodas naudojamas, kai visi kintamieji yra „užteršti“ atsitiktinėmis paklaidomis. Tada funkcija apibrėžiama taip:

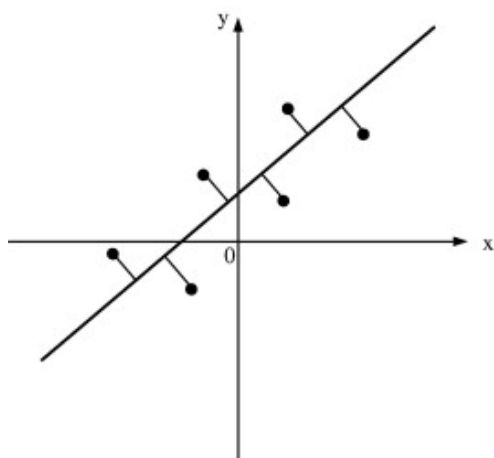
$$J(a, b) = \sum_{i=1}^n p_i w(x - x_i) \frac{(ax_i + b - y_i)^2}{a^2 + 1}. \quad (12)$$

Suminiu mažiausių kvadratų metodu nustatoma koeficientų a ir b įtaka x srities atsižvelgiant į bendrą mažiausių kvadratų reikšmę minimizuojant apibrėžtą funkciją, t. y. mažinant statmenus atstumus kvadratu suminės sumos (2 pav.). Čia duomenų sklaida suderinama tik ortogonaliai kryptimi.

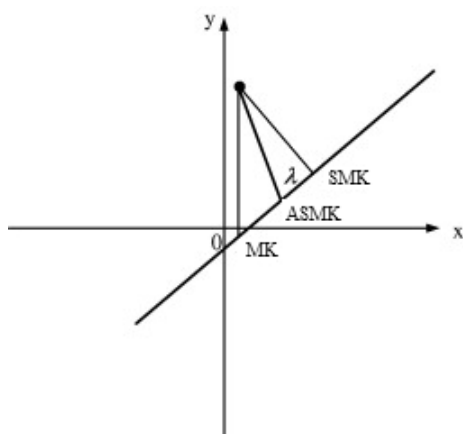
Adaptyvus suminis mažiausių kvadratų (ASMK) metodas leidžia parametru λ keisti duomenų aproksimavimo kryptį, (3 pav.).

Adaptyviame suminiame mažiausių kvadratų metode vietos aproksimavimo funkcija apibrėžiama taip:

$$J(a, b) = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) \frac{\lambda^2 a^2 + 1}{a^2 + 1} (ax_i + b - y_i)^2. \quad (13)$$



2 pav. Vietos derinimas suminiu mažiausių kvadratų metodu, Zhang *et al.* (2014)



3 pav. Vietos derinimas adaptyviu suminiu mažiausių kvadratų metodu, Zhang *et al.* (2014)

Kai $\lambda = 0$, (13) gali būti pakeista į (12). Kai $\lambda = 1$, (13) gali būti pakeista į (11).

Mažiausių kvadratų metodu siekiama, kad atstumai tarp empirinės funkcijos reikšmių ir eksperimento taškų būtų minimalūs. Įrašę x_i reikšmę į empirinės funkcijos išraišką, gausime $f(x, r)$ reikšmę paprastai nelygią y_i , nes y_i reikšmėms turi įtakos eksperimento paklaidos.

Skaičiuojant mažiausių kvadratų metodu, parametrai r turi būti tokie, kad nuokrypių kvadratų suma būtų minimali:

$$\min S = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x, r))^2. \quad (14)$$

Tuomet gauname r kintamųjų funkciją. Tada randamos funkcijos S dalinės išvestinės šių kintamųjų atžvilgiu ir prilyginamos 0:

$$\frac{\partial S}{\partial r} = 0, \text{ kai } r = 1, \dots, m. \quad (15)$$

Gaunama lygčių sistema parametru r atžvilgiu:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, r)) \frac{\partial S}{\partial a} = 0, \\ \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, r)) \frac{\partial S}{\partial b} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Kai empirinė funkcija yra tiesė:

$$y = ax + b, \quad (17)$$

tai dalinių išvestinių sistema bus:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))x_i = 0, \\ \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b)) = 0, \end{cases} \quad (18)$$

kuri pertvarkoma į:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b n = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (19)$$

Išsprendus lygčių sistemą (19), nustatomos regresijos lygties konstantos a ir b .

Tyrimo įranga ir metodika

Tyrimo metu buvo naudojamas TC25 (srauto skaitiklis) mikrobangų įrenginys eismo skaičiavimui ir transporto priemonių klasifikavimui. Jame yra įmontuotas Doplerio radaro greičio jutiklis. Vidinėje atmintyje šis įrenginys gali saugoti iki 300 000 duomenų apie pravažiavusių transporto priemonių skaičių, jų greitį, ilgį ir judėjimo kryptį.

Tyrimai buvo atliekami Vilniuje Plytinės gatvėje. Transporto priemonių skaitiklis buvo tvirtinamas pagal jo techninius reikalavimus, t. y. jis tvirtinamas prie stulpo kelkraštyje ir nukreiptas į kelią 45° kampu. Tvirtinimo aukštis nustatomas iš formulių:

$$d_1 = h \cdot 1,09, \quad (20)$$

$$d_2 = h \cdot 3,17, \quad (21)$$

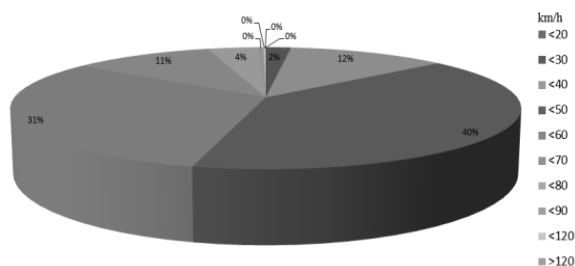
čia d_1 – kelkraščio plotis, m; d_2 – kelio važiuojamosios dalies plotis, m.

Tyrimo rezultatai

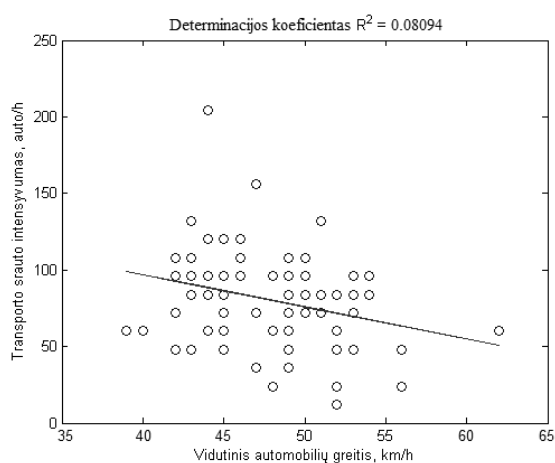
Atlikus matavimus buvo gauti pradiniai duomenys, kurie pateikti 4 pav. išreiškiant pirminius transporto priemonių intensyvumo duomenis procentine išraiška suskirstant pagal važiavimo greičius. Matyti, kad didžiąją automobilių dalį iki 5 m. ilgio sudaro važiuojantys nuo 40 km/h iki 60 km/h greičiu. Mažesnę dalį sudaro automobiliai važiuojantys nuo 30 km/h iki 40 km/h ir nuo 60 km/h iki 70 km/h greičiu.

Duomenys (5 pav.) parodo kaip pasiskirsto transporto srauto intensyvumas priklausimai nuo automobilių

greičio. Esant tam pačiam intensyvumui gaunamos kelios skirtingos greičių reikšmės, todėl duomenų sklaida yra labai didelė. Regresijos lygčiai sudaryti naudojami tik automobilių, kurių ilgis iki 5 metrų, sukaupti transporto srauto intensyvumo ir automobilių greičio duomenys.

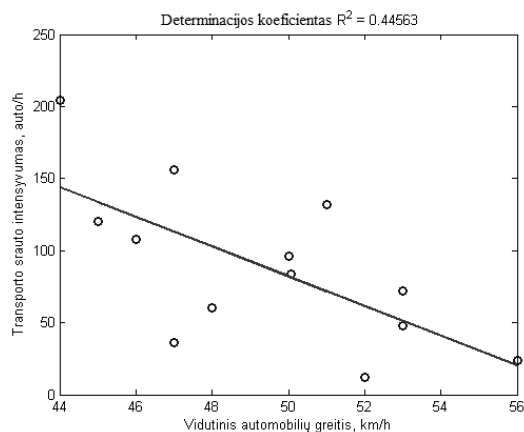


4 pav. Automobilių, kurių ilgis iki 5 m intensyvumas pagal važiavimo greičių grupes (procentinė dalis)



5 pav. Transporto srauto intensyvumo priklausomybė nuo automobilių greičio

Pradiniai duomenys buvo gauti su didele duomenų sklaida. Todėl buvo apskaičiuoti greičių vidurkiai ties kiekvienu pasikartojančiu automobilių skaičiumi ir panaudotas mažiausių kvadratų metodas regresijos lygčiai sudaryti. Tiesinei funkcijai gauti naudojama (17) išraiška. Grafike (6 pav.) parodo, kaip didėjant transporto priemonių skaičiui, tiesiškai mažėja transporto srauto intensyvumas.



6 pav. Transporto srauto intensyvumo priklausomybė nuo automobilių greičių vidurkio

Iš (2) formulės ir iš regresijos lygties

$$q = a + b \cdot v(k), \quad (22)$$

gaunama srauto intensyvumo funkcija.

Apskaičiuavus (22) regresijos lygties koficientus gautos jų reikšmės yra: $a = 599,2$ ir $b = 10,3$.

Tuomet ši lygtis su apskaičiuotais koeficientais užrašoma taip: $q = 599,2 + 10,3v(k)$.

Iš transporto srautų teorijos, bendru atveju, srauto intensyvumas skaičiuojamas pagal formulę:

$$q = v(k) \cdot k. \quad (23)$$

Sulyginamos (22) ir (23) lygčių dešinėsios pusės ir gaunama lygtis:

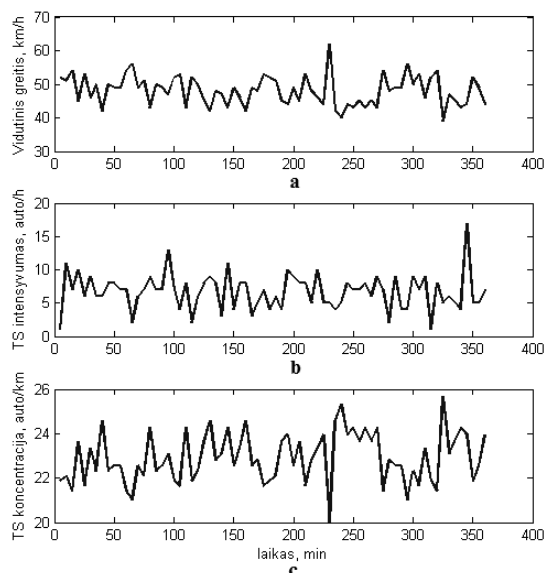
$$v(k) \cdot k = a + b \cdot v(k). \quad (24)$$

Iš (24) lygties išreiškiama transporto srauto koncentracija k . Transporto srauto koncentracijos kitimo išraiška priklausomai nuo išmatuotų verčių apskaičiuojama pagal išraišką

$$k = \frac{a + b \cdot v(k)}{v(k)}. \quad (25)$$

Šiuos duomenis galima naudoti transporto srautų modeliuose įvedant koncentraciją kraštinėse uždavinio sąlygose.

Apskaičiuota transporto srauto koncentracijos reikšmė pateikta grafike (7 pav.) kartu su išmatuotomis srauto intensyvumo ir greičio reikšmėmis:



7 pav. Pagrindiniai transporto srautų parametrai priklausomai nuo laiko: a) vidutiniai greičiai; b) transporto srautų intensyvumas; c) transporto srautų koncentracija

Šie grafikai parodo, kad transporto srautų vidutinis greitis, intensyvumas ir koncentracija yra nepastovūs skirtingu laiko momentu.

Išvados

1. Tyrimo metu nustatyta, kad didėjant transporto priemonių vidutiniam greičiui, mažėja transporto srauto intensyvumas.

2. Naudojant eksperimentinius duomenis sudaryta transporto srauto intensyvumą ir greitį siejanti regresijos lygtis, kurios $R^2 = 0,446$.

3. Pagal siūlomą metodiką apskaičiuotos transporto srauto reikšmės leidžia tiksliau susieti transporto srautų modelius su automobilių eismu gatvėse.

4. Sudarant transporto srautų modelius reikėtų kaupti duomenis skirtingomis paros, oro ir kitomis sąlygomis. Iš jų sudarytos regresijos lygtys labiau atitiktų sąlygas gatvėse.

Literatūra

- Brilon, W.; Lohoff, J. 2011. Speed-flow Models for Freeways, *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 16: 26–36.
- Erlingsson, S.; Jonsdottir, A.M.; Thorsteinsson T. 2006. Traffic Stream Modelling of Road Facilities. Pranešimas konferencijoje „Transport Research Arena Europe 2006“, Gotheburg, 2006 birželio 12–15.
- Leclercq, L.; Chiabaut, N.; Trinquier, B. 2014. Macroscopic Fundamental Diagrams: A cross-comparison of estimation methods, *Transportation Research Part B: Methodological* 62: 1–12.
- Lu, X. Y., Varaiya, P.; Horowitz, R. 2009 Fundamental Diagram Modelling and Analysis Based NGSIM Data, *Control in Transportation Systems* 12(1): 367–374.
- Mauro, R.; Giuffre, O.; Grana, A. 2013. Speed Stochastic Processes and Freeway Reliability Estimation: Evidence from the A22 Freeway, Italy, *Journal of Transportation Engineering* 139(12): 1244–1256.
- Sarasua, W. A; Davis, W. J, Chowdhury, M. A; Ogle, J. H. 2006. Estimating Interstate Highway Capacity for Short-Term Work Zone Lane Closures, *Transportation Research Record* 1948: 45–57.
- Wang, H.; Li, J.; Chen, Q.; Ni, D. 2011. Logistic Modeling of the Equilibrium Speed-density Relationship, *Transport Research Part A: Policy and Practise* 45(6): 554–566.
- Zhang, L.; Gu, T.; Zhao, J.; Ji, S.; Sun, Q.; Hu, M. 2014. An Adaptive Moving Total Least Squares Method for Curve Fitting, *Measurement* 49: 107–112.