

EVALUAREA MĂRIMII FLUXURILOR DE TRAFIC DIN INTERSECȚIILE ÎN SENS GIRATORIU

Drd. ing. Andrei-Alexandru BOROIU, Dr. ing. Alexandru BOROIU

Universitatea din Pitești, România

REZUMAT. Una din căile de creștere a nivelului de serviciu al unei intersecții în sens giratoriu o constituie reducerea fluxurilor de conflict prin redirecționarea fluxurilor rutiere din amonte care traversează intersecția pentru a efectua viraj la stânga. Susținerea unei astfel de decizii necesită însă, evaluarea acestor curenți de trafic. Lucrarea își propune cercetarea posibilităților de a evalua acești curenți de trafic pe baza fluxurilor măsurate în puncte fixe. Utilizând programul Microsoft Excel, au fost determinate prin calcul matricial relațiile analitice ce permit evaluarea curenților de trafic în funcție de fluxurile măsurate în puncte fixe.

Cuvinte cheie: intersecție în sens giratoriu, curent de trafic, intensitatea traficului, observator, rangul matricei.

ABSTRACT. One way to increase the service level of a roundabout intersection is the reduction of conflict flows by redirecting upstream traffic flows crossing the intersection to make the left turn. Sustaining such a decision requires, however, evaluating these streams of traffic. The paper aims to research the opportunities to evaluate these currents flow based traffic measured in fixed points. Using matrix calculation in Microsoft Excel software, analytical relations were determined allowing evaluation of current traffic flows according to measurements at fixed points.

Keywords: roundabout intersection, traffic stream, traffic intensity, observer, matrix rank .

1. FORMULAREA PROBLEMEI ȘI A OBIECTIVELOR

Una din problemele majore cu care se confruntă marile orașe din țară la ora actuală o constituie fenomenul de congestie a traficului rutier, care se manifestă în principal în orele de vârf de trafic.

Acest fenomen este consecința unui nivel de serviciu foarte scăzut al rețelei rutiere în aceste perioade de timp, iar nivelul de serviciu exprimă modul în care capacitatea rețelei rutiere satisface necesitățile de trafic rutier. Evident, îmbunătățirea nivelului de serviciu se poate realiza prin creșterea capacității rețelei și/sau prin reducerea cererii de trafic în zonele unde se manifestă fenomenul de congestie rutieră [4, 6].

Rețeaua rutieră este constituită din artere rutiere și din intersecții rutiere, dar se constată că, aproape întotdeauna, fenomenul de congestie este determinat doar de nivelul de serviciu nesatisfăcător al intersecțiilor rutiere [2].

Acest lucru conduce la un interes deosebit pentru îmbunătățirea nivelului de serviciu al intersecțiilor rutiere din marile orașe.

În ceea ce privește capacitatea intersecțiilor rutiere, interesant este faptul că, în funcție de tipul acestora, se impun două moduri diferite de abordare pentru determinarea capacității acestora:

- în cazul intersecțiilor cu acces reglementat prin semafoare, capacitatea acestora este determinată

doar de caracteristicile geometrice ale amenajării intersecției rutiere și de ciclul de semaforizare, nefiind influențată absolut deloc de caracteristicile traficului (chiar dacă traficul rutier este neomogen, prin echivalarea vehiculelor în vehicule etalon, structura traficului nu se constituie într-un factor determinant), pentru că nu există trafic de conflict între fluxurile de vehicule (pot exista conflicte, totuși, dar numai între un flux de vehicule ce efectuează viraj în intersecție și un flux de pietoni de pe trecerea special amenajată);

- în cazul intersecțiilor în care circulația rutieră este reglementată prin indicatoare de prioritate sau prin regula priorității de dreapta, ca și în cazul intersecțiilor în sens giratoriu, capacitatea de circulație pentru diversele brațe ale intersecției (și, ca urmare, pentru întreaga intersecție) depinde de mărimea volumelor de conflict dintre fluxurile de vehicule, acestea fiind în general continuu variabile în timp, ca urmare a variației continue a curenților de trafic din intersecție (definiți prin traseul urmat de vehiculele ce pătrund în intersecție - brațul de intrare și brațul de ieșire).

În marile orașe din România se observă în ultimii ani un fenomen de proliferare a intersecțiilor în sens giratoriu, apreciindu-se că acest tip de intersecție aduce o serie de avantaje pentru specificul traficului rutier urban.

Ca urmare, există preocupări constante pentru îmbunătățirea nivelului de serviciu al acestor intersecții.

EVALUAREA CURENȚILOR DE TRAFIC DIN INTERSECȚIILE ÎN SENS GIRATORIU

Metodologia de determinare a nivelului de serviciu pentru intersecțiile în sens giratoriu este prezentată în lucrarea dedicată “CNADNR (2009) – Normativ pentru amenajarea intersecțiilor la nivel pe drumuri publice” [8] (elaborată de Search Corporation după “Highway Capacity Manual (2003) - Transportation Research Board, National Academies of Science, USA”, lucrare de referință, editată într-o ediție ulterioară în 2010 [7] și revizuită recent, în 2015).

Modelele matematice principale prin care se evaluează capacitatea pentru fiecare braț al intersecției sunt în funcție doar de volumul fluxului de conflict, care poate fi foarte simplu înregistrat de către un operator de trafic (un operator pentru fiecare braț al intersecției).

Mai există două modele matematice alternative ce pot fi utilizate pentru cazul unei intersecții în sens giratoriu cu o singură bandă pe calea de rulare [8]: un model are ca variabilă doar volumul fluxului de conflict, iar al doilea are două variabile - volumul fluxului de conflict și volumul fluxului de ieșire pe braț – mărimi ce pot fi determinate la fel de simplu, de câte unul sau doi observatori pentru fiecare braț al intersecției.

Deci, pentru a evalua analitic capacitatea unei intersecții în sens giratoriu este suficient să se măsoare toate fluxurile circulare (și, pentru una din metode, toate fluxurile de ieșire) - iar acest lucru este absolut fezabil, cu ajutorul a 1 sau 2 observatori de trafic plasați pe fiecare braț al intersecției – iar verosimilitatea modelului analitic poate fi verificată prin măsurarea efectivă a fluxurilor de intrare sau a fluxurilor de ieșire din intersecție (fig. 1) atunci când se manifestă congestia pe sensurile de intrare ale brațelor intersecției.

Cum amenajarea unei intersecții rutiere (cu reglementarea traseului urmat de fiecare bandă de acces, cu delimitarea benzilor circulare cu marcaje continue sau cu separatoare de bandă) este foarte importantă pentru a crește capacitatea acesteia [5], apare necesitatea de a cunoaște curenții de trafic din intersecție (prin ce braț intră și prin ce braț ies din intersecție).

Dar și mai important este că dacă se cunosc acești curenți de trafic se poate reconsidera reglementarea circulației rutiere în zona unde se află intersecția rutieră în sens giratoriu, prin redirecționarea unora dintre fluxurile din amonte intersecției astfel încât să se reducă solicitarea intersecției rutiere respective și, ca urmare, să se elimine posibilitatea de apariție a congestiei rutiere [1].

Dar este foarte greu de contorizat acești curenți de trafic, deoarece aceasta înseamnă să fie înregistrat pentru fiecare vehicul traseul urmat (din ce braț al intersecției pătrunde în intersecție și prin ce braț părăsește intersecția), ceea ce ar însemna, de fapt,

urmărirea traseului fiecărui vehicul. Acest lucru este practic imposibil de realizat de către observatori de trafic, fezabilă este doar filmarea întregii intersecții și apoi identificarea traseului parcurs de fiecare vehicul în parte. Dar această cale necesită echipamente scumpe și, în plus, este foarte laborioasă și necesită un volum mare de timp pentru prelucrarea înregistrărilor.

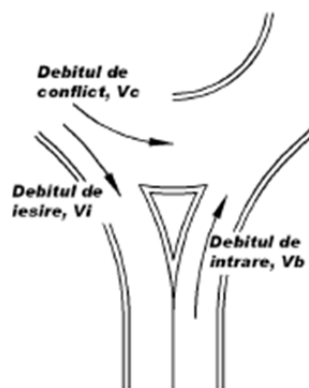


Fig. 1. Fluxurile ce pot fi măsurate cu observatori ficși într-o intersecție în sens giratoriu [7, 8].

Ca urmare, apare următoarea întrebare: *este posibil ca pentru o intersecție în care circulația este reglementată în sens giratoriu (fig. 2), pe baza valorilor măsurate (cu observatori ficși) pentru fluxurile de intrare, fluxurile de ieșire și fluxurile de conflict (circulare), să se determine volumul curenților de trafic?*

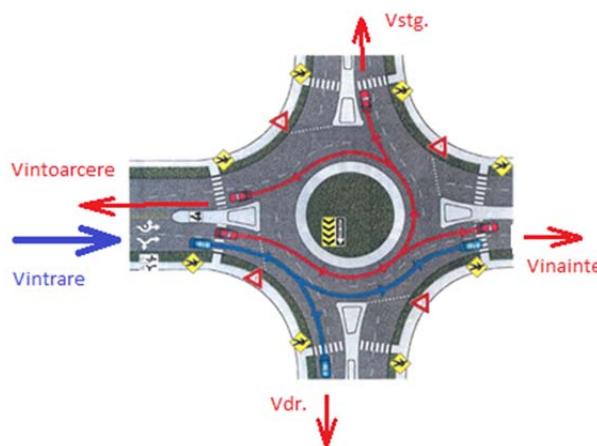


Fig. 2. Curenții de trafic rutier corespunzători unui braț al intersecției în sens giratoriu.

O astfel de întrebare a rezultat în următorul caz concret: după data de 12.10.2015, când s-a dat în funcțiune intersecția în sens giratoriu Calea București – Calea Bascovului din Pitești, înainte de a fi dată în funcțiune și supratraversarea rutieră din proximitate (fig. 3), a apărut congestie rutieră la orele de vârf de trafic și s-a pus întrebarea de către autoritățile locale dacă va dispărea acest fenomen după ce se va da în funcțiune artera rutieră de supratraversare, adică după

ce se finalizează și se dă în funcțiune întreaga amenajare rutieră.

Pentru a formula un răspuns fundamentat științific, a trebuit să se determine fluxul de întoarcere de pe brațul Est și, consultând literatura de specialitate, s-a constatat că nu există relații analitice care să permită determinarea acestui flux în funcție de fluxurile ce pot fi măsurate cu observatori ficși (de intrare, de conflict, de ieșire sau chiar fluxurile de viraj dreapta).

Ca urmare, au fost formulate obiectivele acestei lucrări: *este posibil să se identifice curenții de trafic dintr-o intersecție în sens giratoriu pe baza fluxurilor măsurate de observatori ficși și, în caz afirmativ, care sunt relațiile analitice dintre volumul acestor curenți de trafic și volumul fluxurilor măsurate în puncte fixe?*

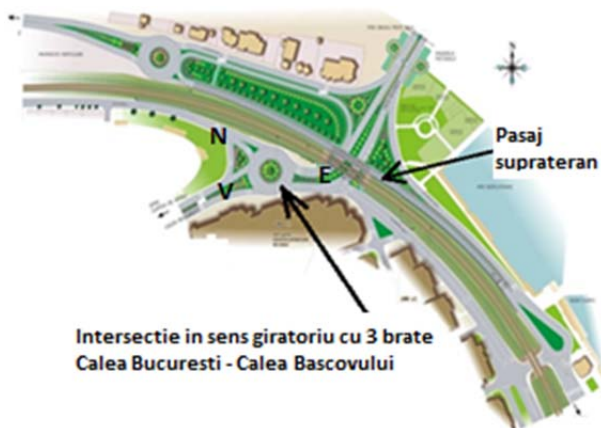


Fig. 3. Intersecție în sens giratoriu cu 3 brațe în cadrul amenajării rutiere de la Podul Viilor [9].

2. MODELAREA MATEMATICĂ A FLUXURILOR

Pentru a găsi răspuns la această întrebare, a fost formalizată circulația rutieră din intersecția în sens giratoriu notând volumul fluxurilor rutiere (numărul de vehicule etalon într-un anumit interval de timp) cât mai asemănător cu notațiile din literatura de specialitate (scrisă în limba română sau într-o limbă străină), astfel:

- volumul fluxurilor de intrare: $V_{i,m}$;
- volumul fluxurilor de ieșire: $V_{e,n}$;
- volumul fluxurilor de conflict (circulare): $V_{c,m}$;
- volumul curenților de trafic, $V_{m,n}$.

În notațiile de mai sus indicele m reprezintă numărul de ordine al brațului de intrare (origine), $m = 1, 2, 3, 4, \dots$, iar n reprezintă numărul de ordine al brațului de ieșire (destinație), $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

Primele 3 categorii de fluxuri sunt fluxurile ce vor fi măsurate, deci ele sunt *date cunoscute* pentru problema formulată anterior, iar ultima categorie de fluxuri reprezintă valorile ce trebuie determinate, deci *datele necunoscute* ale problemei.

Ca urmare, se va analiza această problemă, pentru a descoperi dacă este rezolvabilă, începând cu cea mai simplă intersecție:

A. Intersecția în sens giratoriu cu 2 brațe. Această intersecție nu este de fapt decât o amenajare rutieră pentru calmarea traficului (vehiculele trebuie să încetinească la trecerea pe calea inelară) și, eventual, pentru a permite întoarcerea vehiculelor.

În acest caz, toți curenții de trafic (V_{11}, V_{12}, V_{21} și V_{22}) sunt de fapt fluxuri care se pot măsura direct [Deliu, 2016], deci problema nu există în acest caz.

B. Intersecția în sens giratoriu cu 3 brațe:

• Cazul cu cele mai puține variabile este cel în care nu există fluxuri de întoarcere (de retur), situație în care există relațiile:

$$\begin{aligned} V_{i1} &= V_{12} + V_{13} \\ V_{i2} &= V_{23} + V_{21} \\ V_{i3} &= V_{31} + V_{32} \\ V_{e1} &= V_{21} + V_{31} \\ V_{e2} &= V_{32} + V_{12} \\ V_{e3} &= V_{13} + V_{23} \\ V_{c1} &= V_{32} \\ V_{c2} &= V_{13} \\ V_{c3} &= V_{21} \end{aligned} \quad (1)$$

Se constată că în acest caz există 9 relații analitice liniare și că cei 3 curenți de trafic pentru viraj la stânga rezultă, de fapt, direct prin măsurare:

$$\begin{aligned} V_{32} &= V_{c1} \\ V_{13} &= V_{c2} \\ V_{21} &= V_{c3} \end{aligned} \quad (2)$$

Cealalți 3 curenți de trafic (pentru viraj la dreapta) rezultă destul de simplu ca relații între fluxurile măsurate.

$$\begin{aligned} V_{31} &= V_{e1} - V_{c3} = V_{i3} - V_{c1} \\ V_{12} &= V_{e2} - V_{c1} = V_{i1} - V_{c2} \\ V_{23} &= V_{e3} - V_{c2} = V_{i2} - V_{c3} \end{aligned} \quad (3)$$

În concluzie, este suficient să se măsoare cele 3 fluxuri circulare (care vor fi necesare și la calculul nivelului de serviciu) și cele 3 fluxuri de intrare sau 3 fluxuri de ieșire (de preferat, cele 3 fluxuri de ieșire, deoarece acestea vor fi utile în cazul determinării capacității intersecției și prin metoda alternativă precizată mai înainte).

• Dar cazul cel mai general pentru intersecția analizată este cel în care se au în vedere posibile fluxuri de întoarcere pe fiecare din cele 3 brațe ale intersecției:

– există 9 curenți de trafic (numărul de curenți de trafic este egal cu pătratul numărului de brațe: $3^2 = 9$);

– există $3 \times 3 = 9$ fluxuri măsurabile cu observatori ficși (pe fiecare din cele 3 brațe există 3 fluxuri măsurabile: 1 flux de intrare, 1 flux de ieșire și 1 flux de conflict);

EVALUAREA CURENȚILOR DE TRAFIC DIN INTERSECȚIILE ÎN SENS GIRATORIU

Se constată că în acest caz numărul de relații analitice dintre fluxurile măsurate și curenții de trafic este egal cu numărul de necunoscute (curenții de trafic), deci este cazul unui sistem de 9 ecuații liniare cu 9 necunoscute:

$$\begin{aligned}
 V_{i1} &= V_{12} + V_{13} + V_{11} \\
 V_{i2} &= V_{23} + V_{21} + V_{22} \\
 V_{i3} &= V_{31} + V_{32} + V_{33} \\
 V_{e1} &= V_{21} + V_{31} + V_{11} \\
 V_{e2} &= V_{32} + V_{12} + V_{22} \\
 V_{e3} &= V_{13} + V_{23} + V_{33} \\
 V_{c1} &= V_{32} + V_{22} + V_{33} \\
 V_{c2} &= V_{13} + V_{11} + V_{33} \\
 V_{c3} &= V_{21} + V_{11} + V_{22}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Acest sistem de ecuații poate fi prezentat matricial, pentru a analiza dacă este determinat și dacă este rezolvabil.

S-a utilizat programul Microsoft Excel (poate fi utilizat și programul Matlab) și s-a constatat că determinatul matricei $M_{9,9}$ (cu 9 linii și 9 coloane) este nul, deci sistemul nu este determinat. Continuând analiza, s-a constatat că rangul matricei este 6, deci singurul caz rezolvabil este cel al intersecției cu 3 brațe și fără fluxuri de întoarcere, care a fost însă deja rezolvat mai înainte, chiar printr-o metodă mai simplă – metoda reducerii.

Dar se poate continua cercetarea în situația în care se consideră că vor fi măsurate fluxurile de viraj spre dreapta (singurii curenți de trafic care, totuși, pot fi măsurați de către un observator fix), astfel că problema va fi reluată cu aceste fluxuri drept “date cunoscute”. Rezultă un sistem de ecuații a cărui matrice asociată este prezentată în tabelul 1 (V_{id} reprezintă volumul de trafic de pe brațul i ce virează la dreapta).

Tabelul 1. Matricea fluxurilor rutiere în cazul unei intersecții în sens giratoriu cu 3 brațe (inclusiv cele 3 fluxuri de întoarcere), considerând fluxurile de viraj la dreapta cunoscute

Date cunoscute	Date necunoscute					
	$V_{1,3}$	$V_{1,1}$	$V_{2,1}$	$V_{2,2}$	$V_{3,2}$	$V_{3,3}$
$V_{i,1}-V_{1d}$	1	1	0	0	0	0
$V_{i,2}-V_{2d}$	0	0	1	1	0	0
$V_{i,3}-V_{3d}$	0	0	0	0	1	1
$V_{e,1}-V_{3d}$	0	1	1	0	0	0
$V_{e,2}-V_{1d}$	0	0	0	1	1	0
$V_{e,3}-V_{2d}$	1	0	0	0	0	1
$V_{c,1}$	0	0	0	1	1	1
$V_{c,2}$	1	1	0	0	0	1
$V_{c,3}$	0	1	1	1	0	0

Utilizând programul Microsoft Excel, se constată că această matrice cu 9 ecuații și 6 necunoscute ($M_{9,6}$) are rangul 6, deci sistemul este rezolvabil: *dacă se măsoară și cele 3 fluxuri de viraj la dreapta, pot fi determinați analitic toți ceilalți curenți de trafic (cele 3 fluxuri de viraj la stânga și cele 3 fluxuri de întoarcere).*

Relațiile de pe cele 3 brațe sunt similare și, utilizând o notație unică pentru toate brațele intersecției, se pot formula relațiile analitice pentru fluxurile de întoarcere și pentru fluxurile de viraj stânga astfel:

$$V_{\text{intoarcere}} = V_{\text{conflict}}^{\text{brat stg.}} - (V_{\text{intrare}}^{\text{brat dr.}} - V_{\text{dr.}}^{\text{brat dr.}}) \quad (5)$$

și, de aici:

$$V_{\text{stg.}} = V_{\text{intrare}} - (V_{\text{dr.}} + V_{\text{intoarcere}}), \quad (6)$$

unde:

- V_{intrare} , $V_{\text{dr.}}$, $V_{\text{stg.}}$, $V_{\text{intoarcere}}$ sunt volumele fluxurilor aferente brațului pentru care se realizează calculul (brațul analizat);
- $V_{\text{conflict}}^{\text{brat stg.}}$ este volumul de conflict pentru brațul din stânga brațului analizat;
- $V_{\text{intrare}}^{\text{brat dr.}}$ este volumul de intrare pentru brațul din dreapta brațului analizat;
- $V_{\text{dr.}}^{\text{brat dr.}}$ este volumul de viraj dreapta pentru brațul din dreapta brațului analizat.

În baza acestor relații, utilizând datele măsurate cu observatori ficși în intersecția în sens giratoriu cu 3 brațe Calea București - Calea Bascovului din Pitești s-a putut oferi un răspuns la întrebarea anterioară: pe brațul Est, fluxul de întoarcere reprezenta 70% din fluxul de intrare (adică cca 1700 vehicule etalon/oră din cele 2400 vehicule etalon/oră ce reprezenta fluxul de intrare în perioadele de vârf de trafic) și s-a previzionat că acest flux, ce mărește fluxurile de conflict pentru fiecare din celelalte două brațe, se va reduce substanțial după ce se va da în funcțiune artera rutieră de supratraversare (v. fig. 3), astfel că nu se va mai produce congestia rutieră semnalată.

Noile măsurători, realizate după data de 24.03.2016 – când s-a dat în funcțiune supratraversarea rutieră peste Calea București – au confirmat previziunea: fluxul de intrare, ca și fluxul de întoarcere s-au redus cu cca 700 vehicule etalon/oră (care se regăsesc de acum în fluxul Nord-Sud de pe artera ce supratraversează Calea București), dar fluxul de întoarcere încă are o valoare ridicată, ce nu poate fi ignorată: cca 1000 vehicule etalon/oră.

Acest rezultat, obținut pe cale analitică cu ajutorul formulelor prezentate mai sus, a relevat necesitatea continuării analizei în scopul organizării circulației în zona intersecției în sens giratoriu astfel încât fluxurile de vehicule de pe brațul Est ce efectuează viraj stânga să se reducă și mai mult.

C. Intersecția în sens giratoriu cu 4 brațe. Este rezonabil să se analizeze la început cel mai simplu scenariu posibil, când nu se au în vedere fluxuri de întoarcere pe niciun braț, și numai dacă se constată că în acest caz numărul de relații este mai mare decât cel al necunoscutelor (curenții de trafic) se va decide și analizarea scenariilor mai complexe (cu unul sau mai multe fluxuri de întoarcere).

Astfel, pentru intersecția cu 4 brațe, relațiile dintre fluxuri (se consideră că nu există fluxuri de întoarcere) vor fi:

$$\begin{aligned}
 V_{i1} &= V_{12} + V_{13} + V_{14} \\
 V_{i2} &= V_{23} + V_{24} + V_{21} \\
 V_{i3} &= V_{34} + V_{31} + V_{32} \\
 V_{i4} &= V_{41} + V_{42} + V_{53} \\
 \\
 V_{e1} &= V_{21} + V_{31} + V_{41} \\
 V_{e2} &= V_{32} + V_{42} + V_{12} \\
 V_{e3} &= V_{43} + V_{13} + V_{23} \\
 V_{e4} &= V_{14} + V_{24} + V_{34} \\
 \\
 V_{c1} &= V_{32} + V_{42} + V_{43} \\
 V_{c2} &= V_{43} + V_{13} + V_{14} \\
 V_{c3} &= V_{14} + V_{24} + V_{21} \\
 V_{c4} &= V_{21} + V_{31} + V_{32}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Se constată că există 12 relații analitice liniare în care se regăsesc cei 12 curenți de trafic (cele 12 variabile), astfel că este cazul unui sistem liniar de 12 ecuații cu 12 necunoscute.

Evident, nu mai este cazul să se ia în discuție un scenariu mai complex, nici măcar cu un flux de întoarcere, căci numărul de necunoscute ar depăși numărul de ecuații liniare și, deci, problema ar fi nerezolvabilă pe cale analitică.

Este, deci, un sistem liniar de 12 ecuații cu 12 necunoscute (12 ecuații de gradul 1, care sunt polinoame cu toate variabilele la puterea întâi), care poate fi prezentat matricial, pentru a analiza dacă este determinat și dacă este rezolvabil (tab. 3).

Utilizând programul de calcul Microsoft Excel s-a constatat că determinantul matricei este nul, deci sistemul nu este determinat, adică nu prezintă o soluție unică. S-a constatat că rangul matricei este 8, adică doar 8 ecuații sunt principale, ceea ce înseamnă că se pot determina analitic doar 8 curenți de trafic (în funcție de fluxurile măsurate și de restul de 4 curenți de trafic, ce intervin ca parametri).

Deci, în cazul intersecției în sens giratoriu cu 4 brațe nu pot fi determinați analitic cei 12 curenți de trafic în funcție de cele 12 fluxuri ce pot fi măsurate cu observatori ficși.

Totusi, deoarece s-a constatat că rangul matricei este 8, adică 8 ecuații sunt principale, ceea ce

înseamnă că se pot determina analitic 8 curenți de trafic, există o continuare a explorării ce prezintă interes: *dacă se consideră fluxurile de vehicule ce virează la dreapta – $V_{12}, V_{23}, V_{34}, V_{41}$ drept parametri (acestea fiind, totuși, posibil de măsurat de către observatori ficși), pot fi determinați analitic ceilalți $4 \times 2 = 8$ curenți de trafic (fluxurile de vehicule care merg înainte și fluxurile de vehicule care virează la stânga)?*

Datele cunoscute vor fi cele 12 din matricea $V_{12,12}$, plus cele 4 fluxuri de vehicule ce virează la dreapta, adică 16 date cunoscute.

Astfel, relațiile dintre fluxuri (trecând în membrul stâng al ecuațiilor fluxurile ce vor fi considerate parametri – $V_{12}, V_{23}, V_{34}, V_{41}$) vor fi:

$$\begin{aligned}
 V_{i1} - V_{12} &= V_{13} + V_{14} \\
 V_{i2} - V_{23} &= V_{24} + V_{21} \\
 V_{i3} - V_{34} &= V_{31} + V_{32} \\
 V_{i4} - V_{41} &= V_{42} + V_{53} \\
 \\
 V_{e1} - V_{41} &= V_{21} + V_{31} \\
 V_{e2} - V_{12} &= V_{32} + V_{42} \\
 V_{e3} - V_{23} &= V_{43} + V_{13} \\
 V_{e4} - V_{34} &= V_{14} + V_{24} \\
 \\
 V_{c1} &= V_{32} + V_{42} + V_{43} \\
 V_{c2} &= V_{43} + V_{13} + V_{14} \\
 V_{c3} &= V_{14} + V_{24} + V_{21} \\
 V_{c4} &= V_{21} + V_{31} + V_{32}
 \end{aligned} \tag{8}$$

Notând în membrul stâng din primele 8 ecuații (date cunoscute, calculate ca diferență între 2 fluxuri măsurate) cu V_{id} fluxurile de pe brațul i ce virează la dreapta, matricea sistemului de 12 ecuații cu 8 necunoscute (și 12 date cunoscute, rezultate prin măsurarea a 16 fluxuri rutiere – $V_{j,i}, V_{j,e}, V_{j,c}$ și $V_{j,d}$) va fi cea prezentată în tab. 2.

Utilizând programul de calcul Microsoft Excel s-a constatat că rangul matricei $M_{12,8}$ este 8, adică sunt 8 ecuații principale, ceea ce înseamnă că se pot determina analitic cei 8 curenți de trafic necunoscuți.

Se constată că pot fi reținute ca ecuații principale ultimele 4 ecuații (care necesită cunoașterea celor 4 volume de conflict) și primele 4 ecuații (care necesită cunoașterea celor 4 volume de intrare și a celor 4 volume de viraj la dreapta) sau ecuațiile 5-8 (care necesită cunoașterea celor 4 volume de ieșire și a celor 4 volume de viraj la dreapta).

Rezultă astfel că pot fi determinate analitic cele 4 fluxuri de mers înainte și cele 4 fluxuri de viraj la stânga, dacă sunt măsurate cele 4 volume de conflict, cele 4 volume de viraj la dreapta și încă 4 fluxuri: fie cele 4 fluxuri de intrare, fie cele 4 fluxuri de ieșire.

EVALUAREA CURENȚILOR DE TRAFIC DIN INTERSECȚIILE ÎN SENS GIRATORIU

La fel ca în cazul intersecției cu 3 brațe, și în acest caz relațiile pentru cele 4 brațe sunt similare și, utilizând o notație unică pentru toate brațele intersecției, se pot formula relațiile analitice pentru fluxurile de mers înainte și pentru fluxurile de viraj stânga astfel:

$$V_{stg.} = V_{conflict}^{brat\ fata} - (V_{intrare}^{brat\ dr.} - V_{dr.}^{brat\ dr.}) \quad (1.9)$$

și, de aici:

$$V_{inainte} = V_{intrare} - (V_{dr.} + V_{stg.}), \quad (10)$$

unde:

- $V_{intrare}$, $V_{dr.}$, $V_{stg.}$, $V_{inainte}$ sunt volumele fluxurilor aferente brațului pentru care se realizează calculul (brațul analizat);
- $V_{conflict}^{brat\ fata}$ – volumul de conflict pentru brațul din fața brațului analizat;
- $V_{intrare}^{brat\ dr.}$ – volumul de intrare pentru brațul din dreapta brațului analizat;
- $V_{dr.}^{brat\ dr.}$ – volumul de viraj dreapta pentru brațul din dreapta brațului analizat.

Tabelul 2. Matricea celor 8 fluxuri rutiere pe direcția înainte și pe direcția la stânga în cazul unei intersecții în sens giratoriu cu 4 brațe (fără fluxuri de întoarcere)

Date cunoscute	Date necunoscute, $V_{m,n}$							
	$V_{1,3}$	$V_{1,4}$	$V_{2,4}$	$V_{2,1}$	$V_{3,1}$	$V_{3,2}$	$V_{4,2}$	$V_{4,3}$
$V_{i1}-V_{1d}$	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_{i2}-V_{2d}$	0	0	1	1	0	0	0	0
$V_{i3}-V_{3d}$	0	0	0	0	1	1	0	0
$V_{i4}-V_{4d}$	0	0	0	0	0	0	1	1
$V_{e1}-V_{4d}$	0	0	0	1	1	0	0	0
$V_{e2}-V_{1d}$	0	0	0	0	0	1	1	0
$V_{e3}-V_{2d}$	1	0	0	0	0	0	0	1
$V_{e4}-V_{1d}$	0	1	1	0	0	0	0	0
$V_{c,1}$	0	0	0	0	0	1	1	1
$V_{c,2}$	1	1	0	0	0	0	0	1
$V_{c,3}$	0	1	1	1	0	0	0	0
$V_{c,4}$	0	0	0	1	1	1	0	0

3. CONCLUZII

A fost dezvoltată o cercetare teoretică, într-un mod original, pentru a descoperi dacă este posibil să se determine pe cale analitică curenții de trafic din intersecțiile în sens giratoriu pe baza măsurătorilor de trafic efectuate cu observatori ficși.

S-a constatat că în cazul intersecțiilor în sens giratoriu cu 2 brațe (de fapt, amenajări circulare pe o cale rutieră, pentru calmarea traficului și pentru a oferi posibilitatea de întoarcere a vehiculelor) rezolvarea pe cale analitică nu este necesară.

În cazul intersecțiilor cu 3 brațe se impune determinarea fluxurilor de conflict și a celor de intrare sau ieșire pe brațe pentru a obține cei 6 curenți de trafic. În schimb, scenariul cu fluxuri de întoarcere s-a dovedit nerezolvabil pe baza fluxurilor măsurate cu observatori ficși. O singură posibilitate există în acest caz: măsurarea cu observatori ficși a fluxurilor de vehicule ce virează la dreapta (acest lucru este posibil, totuși), situație în care pot fi determinați cei 6 curenți de trafic pentru vehiculele ce virează la stânga și care întorc în intersecție.

S-a continuat cercetarea teoretică pentru cazul intersecției cu 4 brațe, unde s-a dovedit că nu este posibil să se determine cei 12 curenți de trafic pe

baza celor 12 fluxuri măsurate cu observatori ficși, dar s-a constatat că dacă se consideră drept parametri fluxurile de vehicule ce virează la dreapta (ce pot fi măsurate, totuși, de observatori ficși) noul sistem de 12 ecuații cu 8 necunoscute (curenții de trafic cu vehicule ce merg înainte sau curenții de trafic cu vehicule ce efectuează viraj la stânga) este rezolvabil, având o soluție unică pentru cei 8 curenți de trafic necunoscuți.

Acest lucru înseamnă că pentru intersecțiile cu 3 brațe și cu fluxuri de întoarcere și pentru intersecțiile cu 4 brațe fără fluxuri de întoarcere este posibil să se cunoască complet curenții de trafic pe baza fluxurilor măsurate efectuate cu observatori ficși (care să includă obligatoriu fluxurile de viraj la dreapta), ceea ce este o realizare absolut interesantă și inedită, căci cunoașterea acestor curenți de trafic va permite reconsiderarea reglementării circulației rutiere în zona unde se află intersecția rutieră în sens giratoriu, în scopul fluidizării circulației rutiere în zonă și a eliminării posibilităților de apariție a congestiei rutiere.

Utilizând relațiile de calcul pentru cazul intersecției cu 3 brațe și cu fluxuri de întoarcere, s-au obținut rezultate ce au permis formularea de previziuni cu privire la modul în care se va desfășura circulația rutieră în intersecția în sens giratoriu Calea

INTERACȚIUNI DINTRE TRANSPORTURI ȘI DEZVOLTAREA REGIONALĂ

București – Calea Bascovului din Pitești, după data de 24 martie 2016, când s-a dat în funcțiune artera rutieră ce supratraversează Calea București din municipiul Pitești – previziuni ce au fost confirmate în totalitate de noile măsurători realizate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Boroiu, A., *Circulație rutieră*, Editura Universității din Pitești, România, 2003.
- [2] Boroiu, A-A., Neagu, E., *Trafic rutier și siguranța circulației. Aplicații*, Editura Universității din Pitești, România, 2015.
- [3] Deliu, M., *Evaluarea nivelului de serviciu al intersecțiilor rutiere*, Lucrare de dizertație, Universitatea din Pitești, România, 2016.
- [4] Florea, D., Cofaru, C., Șoica, A., *Managementul traficului rutier*, Ed. Universității Transilvania din Brașov, România, 2000.
- [5] Kimber, R.M., *The traffic capacity of roundabouts*, Crowthorne, USA, 1980.
- [6] Neagu, E., *Trafic rutier și siguranța circulației*, Editura Universității din Pitești, 2003.
- [7] Highway Capacity Manual, *Transportation Research Board*, National Academies of Science, USA, 2010
- [8] CNADNR, *Normativ pentru amenajarea intersecțiilor la nivel pe drumuri publice*, Search Corporation, România, 2009
- [9] <http://www.primariapitesti.ro>.

Despre autori

Drd. ing. **Andrei-Alexandru BOROIU**
Universitatea din Pitești, România

A absolvit în anul 2011 programul de licență Ingineria Transportului și Trafic la Universitatea din Pitești și a susținut examenul de licență la Universitatea Politehnică București. În anul 2013 a absolvit programul de master Logistica Transporturilor la Universitatea Politehnică București și în același an a devenit doctorand la Universitatea din Pitești.

Dr. ing. **Alexandru BOROIU**
Universitatea din Pitești, România

A absolvit în anul 1983 Institutul Politehnic București, Facultatea de Transporturi, specializarea Autovehicule Rutiere, iar în anul 2000 a obținut titlul de doctor în Inginerie Mecanică la Universitatea Transilvania din Brașov. Din anul 2004 este profesor universitar în Departamentul Autovehicule și Transporturi din cadrul Facultății de Mecanică și Tehnologie – Universitatea din Pitești.