

VULNERABILITATEA REȚELELOR DE TRANSPORT DIN MARILE AGLOMERĂRI URBANE

Șef lucr. dr. ing. ec. Eugen ROȘCA
Universitatea „Politehnica” din
București



Este absolvent al Universității „Politehnica” din București, Facultatea de Transporturi. În prezent este șef de lucrări în cadrul catedrei Transporturi, trafic și logistică. Are preocupări în domeniul simulării pe calculator și al conducerii operative a sistemelor de transport, siguranței traficului și marketingului în transporturi

Asist. ing. Florin RUSCĂ
Universitatea „Politehnica” din
București



A absolvit Facultatea de Transporturi a Universității „Politehnica” din București în 2003. A absolvit cursuri postuniversitare în domeniul Logistica distribuției, în anul 2004. În prezent este asistent universitar la catedra Transporturi, trafic și logistică

REZUMAT. Fiabilitatea și vulnerabilitatea rețelelor reprezintă concepte importante în analiza capacității rețelelor de transport de a asigura continuitate în operare, respectiv de a menține nivelul serviciului în limite acceptabile. Cele două concepte sunt prezentate într-o manieră complementară. Fiabilitatea este studiată sub aspectul conectivității, al duratei de călătorie și al capacității, în timp ce vulnerabilitatea este analizată prin intermediul consecințelor indisponibilității arcelor rețelei și mai ales prin intermediul modificării indicelui de accesibilitate Hansen și a costului total de deplasare. Utilizând simularea de tip Monte Carlo și programul TransCad, lucrarea prezintă o metodologie de evaluare a fiabilității și vulnerabilității rețelelor congestionate din marile aglomerări urbane.

Cuvinte cheie: rețele de transport, fiabilitate, vulnerabilitate, accesibilitate, congestia traficului.

ABSTRACT. The concepts of reliability and vulnerability are important when investigating the ability of transport networks to provide continuity in operation and maintaining the level of service between acceptable limits. The two concepts are discussed in a complementary way, outlining the specific features of each one. Reliability is described under connectivity, travel time and capacity aspects, whereas vulnerability is analyzed through the consequences of links or nodes failure, irrespective of the probability of failure, and mainly through changes of Hansen index of accessibility and users total cost. Using Monte Carlo computer simulation and TransCad software, the paper presents a methodology to assess connectivity reliability and vulnerability of congested road networks in large urban areas.

Keywords: transport networks, reliability, vulnerability, accessibility, traffic congestion.

1. FIABILITATEA ȘI VULNERABILITATEA REȚELELOR DE TRANSPORT- CONCEPTE INTERCONECTATE

Conceptele de fiabilitate și vulnerabilitate sunt extrem de importante în evaluarea capacității rețelelor de transport de a asigura continuitate în operare. Dezastrele naturale ce au avut loc în ultimii ani (cutremure, inundații, incendii), actele de agresiune (terorism, sabotaje, războaie), răspândirea habitatelor umane și mai ales extinderea ariilor urbane generează un interes special la nivelul cercetărilor efectuate asupra fiabilității și vulnerabilității rețelelor de transport. Impactul nefuncționării unor noduri sau legături din rețea poate fi impresionant. Decidenții politici, autoritățile locale, urbanistii și inginerii de trafic resimt nevoia unor metode

și instrumente de evaluare a fiabilității rețelelor și de analiză a consecințelor întreruperii funcționalității elementelor componente. Posibilitatea de a evalua, gestiona și minimiza efectele degradării funcționalității rețelelor de transport generează beneficii economice, sociale și ambientale. La nivel urban, aceasta se traduce prin reducerea costurilor de deplasare pentru utilizatori, diminuarea congestiei și a externalităților negative, continuitate pentru activitățile sociale și comerciale. Fiabilitatea elementelor rețelelor de transport exprimă capacitatea de bună funcționare pe durata unei perioade date, în condiții precizate de exploatare. Dacă anumite elemente ale rețelei de transport cedează, rețeaua poate rămâne funcțională deși cu performanțe mai scăzute.

Se diferențiază trei forme ale fiabilității rețelei [1, 2]:

◆ *fiabilitatea în raport cu conectivitatea rețelei* – probabilitatea ca două noduri din rețea să rămână conectate;

◆ *fiabilitatea în raport cu durata călătoriei* – probabilitatea ca deplasarea între două noduri să se finalizeze într-un interval dat; durata deplasării este afectată de gradul de informare a șoferilor și de variația fluxurilor de trafic;

◆ *fiabilitatea în raport cu capacitatea arcelor* – probabilitatea ca o rețea să satisfacă un nivel dat al cererii de transport; rezerva de capacitate preia o pierdere de capacitate datorată degradării unor elemente ale rețelei.

Vulnerabilitatea rețelelor exprimă consecințele defectării elementelor rețelei, fără a ține cont de probabilitatea de defectare. Este posibil ca defectarea elementelor rețelei să aibă o probabilitate mică, dar atunci când evenimentul are loc, impactul social, economic și ecologic poate avea o asemenea intensitate, încât să constituie o problemă majoră. Analiza vulnerabilității evidențiază defecțiunile structurale din topologia rețelei. Taylor și D'Este [1] deosebesc două forme ale vulnerabilității rețelelor de transport:

◆ *vulnerabilitatea în raport cu costul de deplasare* – dacă degradarea uneia sau mai multor legături ale unei rute ce leagă două noduri conduce la o creștere substanțială a costului generalizat de deplasare, atunci conexiunea între aceste noduri este vulnerabilă;

◆ *vulnerabilitatea în raport cu accesibilitatea* – un nod este vulnerabil dacă defectarea unui număr mic de legături din rețea are ca efect o scădere importantă a accesibilității nodului respectiv.

2. EVALUAREA FIABILITĂȚII ÎN RAPORT CU CONECTIVITATEA REȚELEI

Probabilitatea ca două noduri ale unei rețele să rămână conectate depinde de probabilitatea de funcționare a rutelor care leagă cele două noduri [2,3,4]. Probabilitatea de funcționare $P(\mathbf{X}_{ij})$ a unei mulțimi de arce $\mathbf{X}_{ij} = (ik, kl, \dots, sj)$ care conectează două noduri i și j , este $P(\mathbf{X}_{ij}) = \prod_{kl \in \mathbf{X}_{ij}} p_{kl}$, unde p_{kl} este probabilitate de

bună funcționare a legăturii (kl). Fiabilitatea nodurilor tranzitate se consideră ca fiind egală cu 1. Eventualele disfuncționalități apărute la nivelul nodurilor pot fi transferate probabilităților de bună funcționare a arcelor adiacente. Fiecare rețea de transport se descompune în mulțimea drumurilor minime, respectiv a tăieturilor minime.

Calea minimă dintre două noduri reprezintă succesiunea de arce în care orice defect al unui arc conduce la refuzul legăturii. Orice cale minimă A_{ij} ce unește nodurile i și j ale rețelei are asociată o funcție logică

$\alpha(A_{ij})$ care ia valoare 1 în cazul în care legătura este operațională și 0 în caz contrar:

$$\alpha(A_{ij}) = \bigcap_{kl \in A_{ij}} x_{kl}, \quad (1)$$

unde $x_{kl} = 1$ dacă arcul (kl) este funcțional și 0 dacă nu este funcțional.

Secțiunea minimă reprezintă mulțimea de arce în care restabilirea funcționalității unui arc determină refacerea conexiunii dintre cele două noduri. Fiecare secțiune minimă B_{ij} corespunzătoare perechii de noduri i și j are asociată o funcție logică $\beta(B_{ij})$ care ia valoarea 0 dacă toate arcele componente sunt nefuncționale și 1 dacă cel puțin unul dintre ele este operațional:

$$\beta(B_{ij}) = \bigcup_{kl \in B_{ij}} x_{kl}. \quad (2)$$

Structural, rețeaua de transport poate fi reprezentată prin mulțimea căilor minime dispuse în paralel sau prin mulțimea tăieturilor minime dispuse în serie. Se constată că în reprezentarea formală a rețelelor de transport, un arc poate aparține diferitelor căi și secțiuni minime. Prin urmare, fiabilitatea rețelei nu se poate evalua pe baza unui model matematic conceput pe ipoteza independenței elementelor, dar este posibil să se estimeze limitele maxime și minime ale probabilității de realizare a conexiunii dintre două noduri:

$$\prod_{s=1}^S \left[1 - \prod_{kl \in B_{ij}^s} (1 - p_{kl}) \right] \leq P(\mathbf{X}_{ij}) \leq 1 - \prod_{q=1}^Q \left(1 - \prod_{kl \in A_{ij}^q} p_{kl} \right), \quad (3)$$

unde: S este numărul de tăieturi minime; Q – numărul de căi minime ce leagă perechea de noduri (i, j).

Pentru rețelele de mari dimensiuni este dificilă identificarea tuturor căilor minime, respectiv a tăieturilor minime. Simularea Monte Carlo reprezintă o metodă adecvată în estimarea fiabilității rețelelor complexe. Metoda are la bază generarea aleatoare a stărilor arcelor rețelei și calcularea probabilității de conexiune dintre oricare două noduri. În figura 1 sunt redată graficul neorientat asociat unei rețele și probabilitățile de realizare a conexiunii dintre oricare două noduri.

3. VULNERABILITATEA REȚELELOR

3.1. Vulnerabilitatea în raport cu indicele de accesibilitate

Taylor și D'Este [1] utilizează indicele de accesibilitate Hansen în caracterizarea vulnerabilității rețelelor de transport.

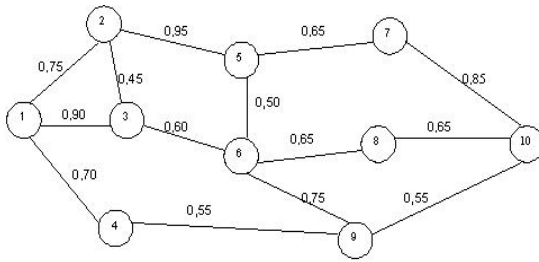


Fig. 1. Probabilitățile de conexiune dintre noduri.

$P(X_{ij}) \times 10^2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	95,97	97,19	84,27	95,65	93,75	94,06	85,53	90,75	97,62
2	-	-	91,27	79,87	98,62	90,83	92,03	82,48	86,65	94,08
3	-	-	-	81,85	93,49	92,98	91,65	83,61	88,79	95,42
4	-	-	-	-	79,22	80,56	78,86	72,91	81,82	82,32
5	-	-	-	-	-	89,99	91,99	82,18	86,22	93,86
6	-	-	-	-	-	-	87,45	85,63	91,16	92,38
7	-	-	-	-	-	-	-	76,99	78,71	92,74
8	-	-	-	-	-	-	-	-	76,38	84,57
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89,04

Accesibilitatea pentru un nod i este:

$$A_i = \sum_{j \neq i} B_j f(c_{ij}), \quad (4)$$

unde: B_j reprezintă atracția exercitată de nodul j ; c_{ij} – costul generalizat al deplasării între nodurile i și j ; $f(c_{ij})$ – funcția de impedanță a deplasării. De obicei, funcția de impedanță se exprimă ca inversul costului generalizat sau sub forma unei funcții exponențial negative ($f(c_{ij}) = e^{-\beta c_{ij}}$, unde β este un parametru de calibrare).

Indicele de accesibilitate nodală este dat de relația:

$$HA_i = \frac{\sum_{j \neq i} B_j f(c_{ij})}{\sum_{j \neq i} B_j}, \quad (5)$$

iar indicele de accesibilitate pentru întreaga rețea de transport:

$$TA = \sum_i HA_i. \quad (6)$$

Un eveniment perturbator apărut la nivelul rețelei, cu consecințe asupra funcționării arcului k , duce la o scădere a valorilor indicilor de accesibilitate:

$$\begin{aligned} \Delta HA_i &= HA_i^{(0)} - HA_i^{(k)}, \\ \Delta TA &= TA^{(0)} - TA^{(k)}. \end{aligned} \quad (7)$$

unde indexul (0) se referă la rețeaua inițială, iar indexul (k) la rețeaua în care legătura k este nefuncțională.

3.2 Vulnerabilitatea în raport cu costul de deplasare

Jenelius *et al.* [5] propun ca metodă de măsurare a diminuării performanțelor rețelei, variația costului generalizat al călătoriei. Dacă arcul k aparține mulțimii de arce a căror neoperabilitate nu izolează părți ale rețelei, atunci importanța acestei legături pentru întreaga rețea este:

$$\Omega(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} \phi_{ij}(c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} \phi_{ij} c_{ij}^{(0)}}, \quad (8)$$

unde: $c_{ij}^{(0)}$ este costul generalizat al deplasării din nodul i în nodul j în rețeaua inițială; $c_{ij}^{(k)}$ costul specific pentru rețeaua în care arcul k este nefuncțional.

În plus, nefuncționarea unei legături, se traduce și printr-o expunere a nodurilor. Vulnerabilitatea unui nod i se determină prin:

$$\Phi(i) = \max_{k \in L^{n-c}} \frac{\sum_{j \neq i} \phi_{ij}(c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_{j \neq i} \phi_{ij} c_{ij}^{(0)}}. \quad (9)$$

unde: L^{n-c} reprezintă mulțimea arcelor a căror nefuncționare nu izolează părți ale rețelei.

4. STUDIU DE CAZ PRIVIND VULNERABILITATEA REȚELEI RUTIERE DIN ZONA CENTRALĂ A BUCUREȘTILOR

Rețeaua de transport din București include o axă principală de la Nord la Sud, cu valori mari ale capacității de tranzitare, dar și una de la Est la Vest. Graful radial-circular reprezentat în figura 2 este utilizat pentru modelarea rețelei de drumuri pentru un oraș cu o evoluție istorică asemănătoare Bucureștilor [6].

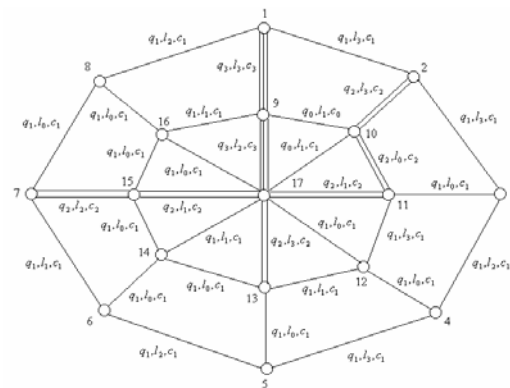


Fig. 2. Rețeaua radial-circulară de drumuri din zona centrală a orașului București:

q_i – capacitate; l_i – lungime; c_i – funcția de cost.

Arcele grafului au valori proprii pentru lungime, capacitate și funcții de cost. Se consideră patru categorii de lungimi ale arcelor ($l_0 = 0,5$ km; $l_1 = 1$ km; $l_2 = 1,5$ km; $l_3 = 2$ km). Capacitatea și funcția caracteristică a costului de deplasare a utilizatorilor pe arce sunt redată în tabelul 1, în acord cu specificațiile literaturii de specialitate [6, 7, 8].

Tabelul 1

Proprietățile arcelor rețelei

Tip	Capacitate [veh.ech./h/sens]	Funcția de cost a utilizatorilor [10^{-2} EUR/km/h]
Trei sau mai mulți benzi pe sens	6000 (q_3)	$3 + 3,6(\phi / q_3)^7 (c_3)$
Două benzi pe sens	4000 (q_2)	$3,2 + 3,8(\phi / q_2)^7 (c_2)$
O bandă pe sens	2000 (q_1)	$3,36 + 4,04(\phi / q_1)^7 (c_1)$
Sens unic	1500 (q_0)	$3,36 + 4,04(\phi / q_0)^7 (c_0)$

Matricea O-D din tabelul 2, redă fluxurile de trafic din orele de vârf. Fluxurile sunt repartizate în rețea prin metoda mediilor succesive, care asigură atingerea echilibrului lui Wardrop [9].

Importanța arcelor (vulnerabilitatea) rețelei în raport cu modificările costului de deplasare este redată în figura 3.

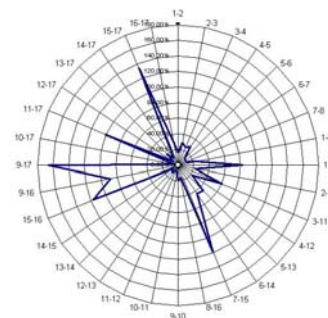


Fig. 3. Importanța arcelor rețelei raportată la variația costului utilizatorilor.

Cele mai vulnerabile secțiuni ale rețelei conțin arce care intră în compunerea axelor N-S și E-V (9-17, 15-17, 7-15, 11-17). Nefuncționarea legăturii 9-17 induce o creștere a costurilor totale a utilizatorilor cu 166%, iar nefuncționarea legăturii 15-17 cu 134%. De asemenea, o mare importanță au și legăturile 15-16 și 9-16 care conectează nordul orașului cu zona vestică, ocolind nodul central. În ultima decadă, aceste zone ale orașului sunt principalele destinații de dezvoltare a noilor spații rezidențiale și comerciale, și în consecință sunt generatoare de fluxuri importante de trafic. În prezent municipalitatea finanțează proiecte pentru crearea de rute alternative între nordul și vestul capitalei, fapt ce va ameliora vulnerabilitatea rețelei.

Tabelul 2

Matricea deplasărilor [veh.ech./h]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	-	200	100	-	100	-	300	200	500	-	300	-	-	100	100	-	1000
2	500	-	400	-	-	-	700	800	-	-	-	-	-	-	-	-	300
3	200	-	-	100	100	-	300	700	600	300	100	-	-	-	500	400	200
4	500	300	100	-	100	100	200	500	100	100	100	100	-	-	200	200	200
5	200	500	200	-	-	100	200	-	700	300	200	-	400	-	-	100	400
6	400	600	300	100	-	-	100	-	300	400	-	-	100	100	100	-	300
7	500	700	900	800	50	100	-	100	700	300	400	100	100	100	400	100	600
13	300	800	200	-	100	-	-	500	300	200	300	-	-	-	300	-	400
16	900	800	700	900	200	300	500	100	50	150	300	500	-	100	-	-	700

BIBLIOGRAFIE

[1] Taylor, M., D’Este, G., „Transport Network Vulnerability: a Method for Diagnosis of Critical Locations in Transport Infrastructure Systems”, în *Critical Infrastructure: Reliability and Vulnerability* (Editori: Murray, A., Grubestic, T.), Springer Verlag, Berlin, 2007.
 [2] Bell, M., Iida, Y., *Transportation Network Analysis*, John Wiley and Sons, Chicester, 1997.
 [3] Raicu, Ș., Roșca, E., „Transport Network Reliability”, National Symposium of Cybernetic Academy “Ștefan Odobleja”, University of Oradea, 2004.
 [4] Raicu, R., Raicu, Ș., Popa, M., „The Influence of Transportation Network Reliability on City Logistics”, în *Recent advances in city logistics* (Editori: Taniguchi, E., Thompson, R.G.), Elsevier, 2005.

[5] Jenelius, E., Petersen, T., Mattson, L., „Importance and Exposure in Road Network Vulnerability Analysis”, *Transportation Research, Part A*, 40, 2006.
 [6] Popa, M., Raicu, Ș., Roșca, E., Costescu, D., „Optimal planning for developing, modernizing and maintaining the street infrastructure of dense and large urban areas”, în *Urban Transport XIII: Urban Transport and the Environment in the 21st Century* (Editori: Brebbia, C.A.), Wessex Institute of Technology, Southampton, 2007.
 [7] Steenbrink, P.A., *Optimization of Transport Networks*, John Wiley and Sons, London, 1974.
 [8] Popa, M., *Elemente de economia transporturilor*, Editura Bren, București, 2004.
 [9] Ortúzar, J.D., Willumsen, L.G., *Modelling Transport*, John Wiley and Sons, London, 2001.