

## COORDONAREA SEMAFOARELOR DE TRAFIC

### 1. Introducere

Multe orașe s-au dezvoltat și au crescut în dimensiuni într-o perioadă foarte scurtă, lipsindu-le însă infrastructura de drumuri necesară unui trafic modern, precum și fondurile necesare implementării acesteia. Acest fapt conduce la folosirea ineficientă a rețelei de drumuri, de multe ori sub forma unor drumuri întinse, cu multe semafoare, adesea foarte apropiate între ele.

Efectul opririi vehiculelor într-o intersecție semnalizată este formarea unei cozi în spatele liniei de oprire. Când această coadă este eliberată de culoarea verde a semaforului, ea se va descărca la capacitatea maximă (fluxul de saturație) și va înainta sub forma unui pluton. Dacă atunci când plutonul se apropie de o altă intersecție semaforizată, timpul de sosire coincide cu începutul timpului de verde, vehiculele nu au nici o întârziere la trecerea prin intersecție. Dacă plutonul trebuie să oprească, coada de așteptare se mărește și poate depăși capacitatea drumului, crescând până provoacă blocaj și în intersecția anterioară.

Obiectivele coordonării semafoarelor sunt:

- prevenirea extinderii cozii de vehicule dintr-o intersecție și interferarea acesteia cu alte intersecții;
- creșterea capacității drumului;
- sporirea confortului șoferului prin reducerea numărului de opriri și fluidizarea traficului;
- oferirea unor întârzieri totale minime pentru utilizatorii drumurilor, micșorând timpul de călătorie;
- reducerea consumului de combustibil - deci reducerea poluării în zonă;
- impunerea unei conduite de siguranță șoferilor, deoarece ei merg grupați cu viteza stabilită pentru unda verde; se reduce astfel probabilitatea depășirii vitezei maxime legale și implicit a numărului de accidente ca și gravitatea acestora.

### 2. Sistemul progresiv simplu („unda verde”)

Cea mai utilizată metodă de interconectare a semafoarelor folosește un timp de ciclu (serie completă de etape în care toate manevrele de trafic sunt servite pe rând. Timpul de ciclu este suma timpilor tuturor etapelor) comun pentru toate intersecțiile, iar semafoarele sunt sincronizate astfel încât perioadele de plecare de la acestea să fie în legătură unele cu altele, în concordanță cu viteza pe drumul respectiv, pentru a rezulta o "progresie" de perioade de verde de-a lungul drumului, în ambele direcții. Viteza de deplasare trebuie considerată rezonabilă de către șoferi. Dar dacă depășirea vitezei era un lucru des întâlnit înainte de coordonare, atunci viteza măsurată va fi prea mare pentru o deplasare sigură. În acest caz

trebuie folosită o viteză moderată pentru a asigura deplasarea plutonului conform limitei legale.

Timpii semafoarelor într-un sistem progresiv simplu pot fi stabiliți cu ajutorul diagramelor prezentate în figurile 1. și 2.:

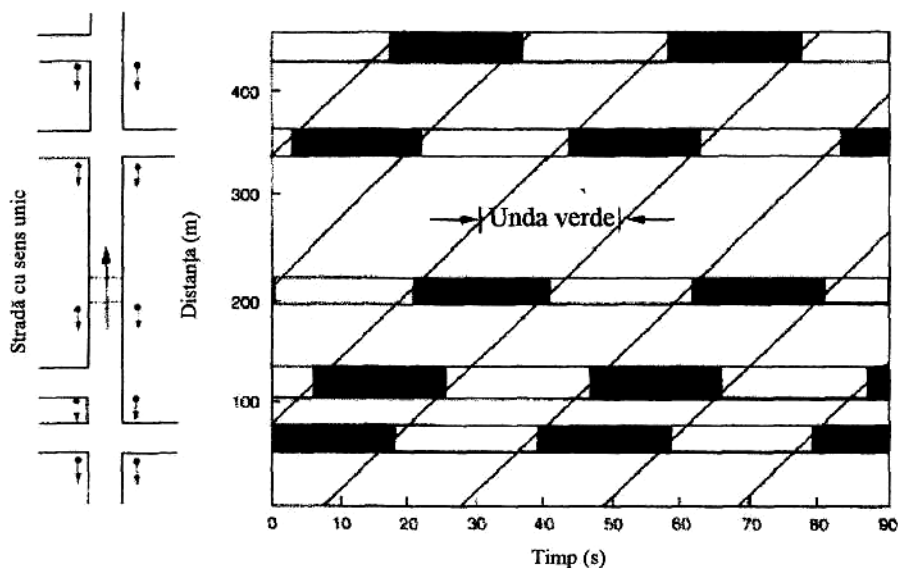


Figura 1. Coordonarea semnalelor pentru o stradă cu sens unic

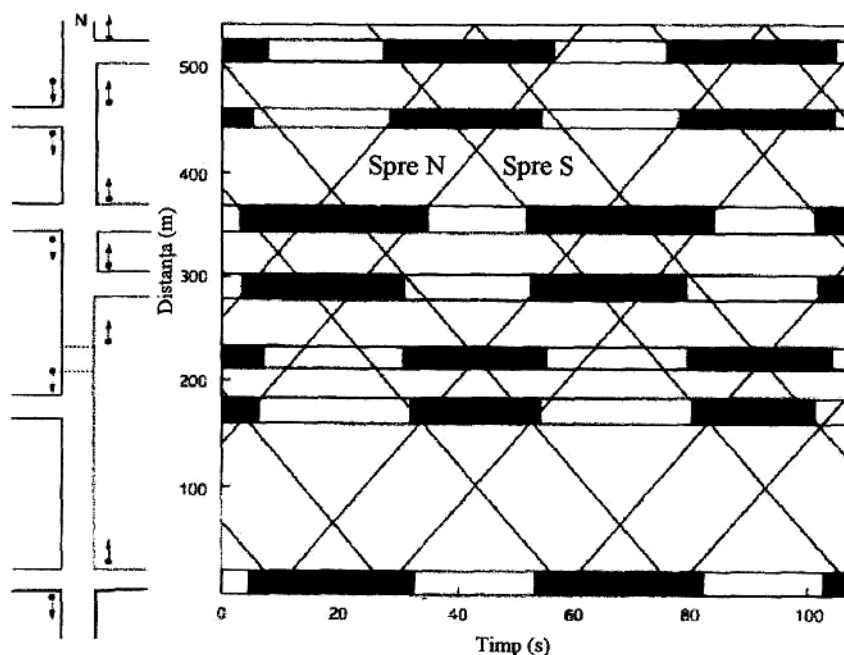
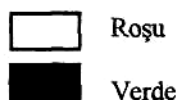


Figura 2. Coordonarea semnalelor pentru o stradă cu dublu sens



Pe aceste diagrame, distanțele între intersecții de-a lungul drumului sunt reprezentate pe abscisă (axa Y), iar timpii de călătorie sunt reprezentați pe ordonată (axa X). Liniile înclinate reprezintă vitezele alese pentru progresie și stadiile de verde în intersecții succesive. În mod normal, problema este de determinare, prin

încercări și erori, a vitezei optime pentru un timp de ciclu fixat. Pentru drumul cu sens unic, benzile verzi urmează una alteia, în secvență. Șoferul, trecând printr-o intersecție, va avea culoarea verde când va ajunge în fiecare intersecție.

Atunci când strada este cu sens dublu și intersecțiile nu sunt la distanțe egale, apare o situație mai complexă și poate fi necesar să se ajungă la un compromis pentru progresele celor două direcții. Poate fi de asemenea necesar să se țină cont și de alte condiții, cum ar fi fluxurile de vehicule de pe străzile laterale.

Metoda diagramei timp-distanță poate fi folosită pentru a favoriza o anumită direcție, de exemplu favorizarea vârfului de trafic de dimineață pe o direcție cu costul creșterii întârzierii a câtorva vehicule călătorind pe direcția opusă. Situația poate fi inversată pentru vârful de trafic de seară. Timpul de ciclu pentru un sistem de semnalizare coordonată trebuie să fie același pentru un singur sens de circulație și este în mod normal stabilit de semnalizarea unei intersecții principale (de exemplu intersecția cu fluxul de trafic cel mai mare). Timpul de verde care este în plus, ar trebui alocat pentru a elibera traficul care intră pe strada principală de pe drumurile secundare, pentru a nu întârzia plutonul ce traversează intersecția.

### **3. Mecanisme pentru interconectarea semafoarelor**

#### **3.1. Interconectarea prin cablu**

Controlerele locale de semnalizare ce lucrează în intersecții, pot fi legate prin cablu de un controler principal. Acesta asigură sincronizarea controlerelor locale, prin trimiterea unor semnale de control sau a unor instrucțiuni.

#### **3.2. Interconectarea fără cablu**

Legătura între semafoare se poate realiza, de asemenea, prin alte tipuri de legături, ce nu necesită cablu, cum ar fi radio, etc. Concepute inițial pentru a oferi avantajul unei coordonări pe arie largă, evitând în același timp costul mare al cablurilor subterane, aceste sisteme sunt acum mai puțin competitive decât sistemele CTZ, deoarece nu permit supervizarea rețelei și detectarea defectelor sau folosirea unor sisteme dependente de trafic, cum ar fi controlul cozilor de la semafor.

#### **3.3. Semnale coordonate cu timp prestabilit**

Aceste sisteme se bazează pe presupunerea că valorile fluxurilor de trafic se repetă săptămânal și setările de semnalizare pot fi pregătite pentru a face față unor fluxuri previzibile. Timpii de semnalizare pot fi stabiliți pentru o zi din săptămână sau pentru o oră din zi. Aceste sisteme au nevoie de controlere cu ceasuri interne sincronizate și, tipic, un minim de 6 planuri de semnalizare din care să aleagă.

De obicei, acestea includ planuri pentru:

- vârful de dimineață;
- vârful de după-amiază;

- vârfurile de seară:
- sâmbete, duminici și sărbători:
- lumini galbene intermitente pentru noapte.

### 3.4. Controlul traficului zonal (CTZ)

Controlul traficului zonal este un control centralizat al semafoarelor de pe o zonă extinsă, ce folosește microprocesoare și tehnologii informatice. De obicei, controlerele locale de pe străzi sunt legate la unul sau mai multe calculatoare centrale, prin cabluri de transmisie de date. Cablurile acestei rețele pot fi dedicate sau pot fi circuite închiriate ale companiei telefonice (sau o combinație a ambelor, în funcție de cost). Controlul urban al traficului (CUT) implică coordonarea centrală a semafoarelor, la fel ca și CTZ, dar include și alte facilități, cum ar fi controlul spațiilor de parcare sau panouri cu mesaje variabile.

Principalele facilități oferite de CTZ sunt:

- condiții optimizate de semnalizare: cu ajutorul controlului calculatorului central setările semafoarelor pot fi optimizate pentru o zonă pentru a produce întârzieri minime și pentru a reduce timpul de călătorie
- flexibilitatea controlului: schimbarea condițiilor de trafic poate fi furnizată pentru actualizarea valorilor fluxurilor. Setările semafoarelor pot fi ușor modificate prin intervenție manuală de la central de control; astfel se poate modifica planul actual de semnalizare sau acesta se poate înlocui cu un nou plan
- monitorizarea defectelor: una dintre cele mai importante facilități oferite este monitorizarea continuă a operațiunilor semafoarelor legate la calculator. Orice defect este detectat și raportat imediat astfel încât repararea să poată începe cât mai rapid
- prioritatea vehiculelor de urgență sau a celor destinate transportului public de călători: pentru mașinile de pompieri, de exemplu, care pornesc mereu din același loc, pot fi stabilite planuri speciale de semaforizare, în funcție de anumite „trasee preferate”, acestea fiind memorate în calculatorul central.
- reducerea numărului de accidente: sistemul CTZ îmbunătățește siguranța în trafic, din implementările actuale (Canada, Anglia, Scoția etc.) rezultând o diminuare a numărului de accidente cu până la 20%.

Implementările sistemului CTZ sunt multiple, pornind de la analiza timpilor actuali de semaforizare și modificarea acestora, la analiza intersecției și stabilirea tuturor modificărilor necesare (numărul de benzi, lățimea acestora, timpii de semaforizare etc.) și până la implementarea unui sistem dependent total de trafic.

În figura 3 se prezintă evoluția beneficiilor în funcție de costuri. Se observă că situația optimă este data de Etapa 3, care presupune analiza traficului și a intersecției și obținerea unui plan de semaforizare cu timp prestabilit.

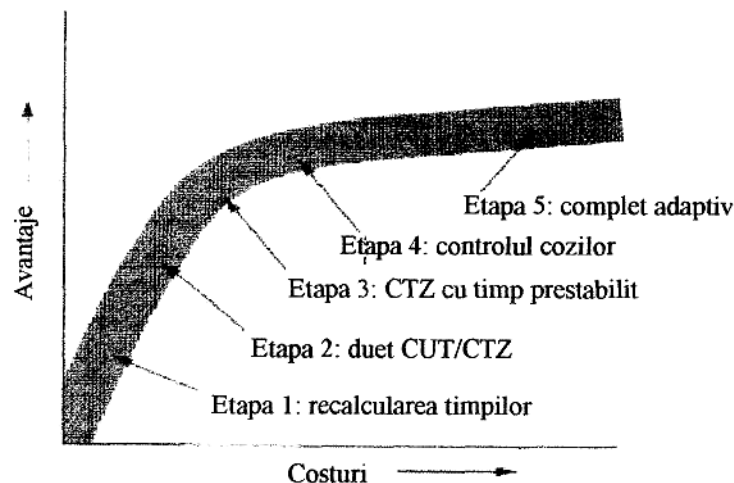


Figura 3. Raportul cost/beneficii pentru diferite tipuri de coordonare a semafoarelor

### 3. Optim local / Optim global

După efectuarea optimizării regimurilor intersecțiilor (faze, semnalizări), luate separat, trebuie să ne îndreptăm atenția spre secțiuni mai mari de rețele stradale urbane. Înainte, traficul care intra și cel care ieșea dintr-o intersecție era folosit sub formă de medie statistică pentru calcularea optimului local. Acum trebuie tratat traficul ca un proces discontinuu, întrerupt regulat de semafoarele din trafic.

După calcularea optimului local pentru fiecare intersecție, este necesar să armonizăm intersecțiile individuale între ele, adică să generăm cea mai bună aproximare a unei progresii omnidirecționale (prin progresie se înțelege "unda verde"). De obicei, acest lucru se reușește doar pentru o singură direcție din cele patru, printr-o coordonare judicioasă a fazelor verzi succesive. Fără armonizare, traficul, inițial continuu, este întrerupt în mod regulat de semafoarele din intersecții, ce nu sunt corelate unele cu altele pentru a permite vehiculelor traversarea intersecțiilor fără oprire. Armonizarea optimizează timpii de verde pentru a realiza o minimizare a întârzierilor datorate opririlor și a timpilor de verde nefolosiți. Din experimente rezultă că, atunci când traficul este sub un anumit nivel, este suficient să se modifice doar timpii de pornire ai ciclului, în timp ce lungimea ciclului și împărțirea acestuia rămân neschimbate. Când traficul este mare, trebuie făcute ajustări și la aceste ultime două valori.

Între intersecții adiacente este necesar să se genereze mesaje, să se transmită și să se interpreteze. Fiecare mesaj, trimis în mod asincron, conține informații despre expeditor, destinatar (identificatorul intersecțiilor respective), faza și parametrii de semnalizare și valorile fluxului de trafic. Procesorul din intersecție determină apoi un compromis între parametrii de control ai propriei intersecții și cei obținuți din mesaj de la intersecțiile adiacente. Important, cererile conținute în mesaje sunt analizate în conformitate cu fluxurile de trafic de la originea mesajului.

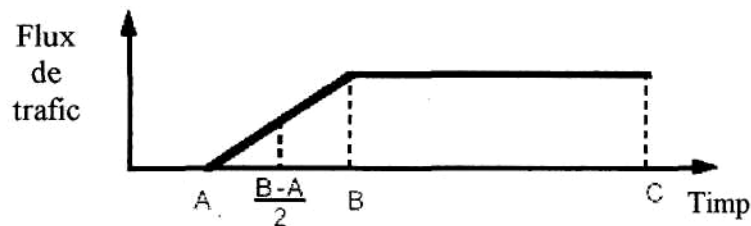
Principale presupuneri sunt:

- atât întârzierile datorate opririlor, cât și perioadele nefolosite de verde sunt dăunătoare eficienței regimului de control. Ceea ce contează este câte vehicule și

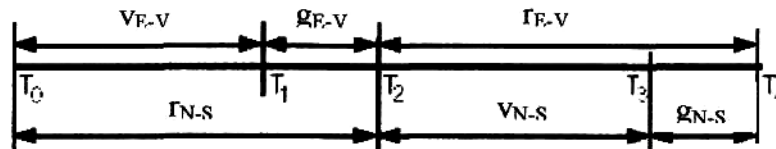
cât timp așteaptă la o intersecție înainte să o poată traversa; de asemenea contează câte vehicule nu folosesc și pentru cât timp nu se folosește perioada de verde;

- vehiculele pot staționa (aștepta) sau merge în plutoane de dimensiune "necesară" la o viteză constantă. Adică, într-o variantă simplificată, accelerarea și frânarea se consideră instantanee;

- în limita fluxului descris, cozile de așteptare la lumina roșie a semaforului nu sunt niciodată prea lungi și permit tuturor mașinilor să treacă pe timpul duratei următoare de verde (nu mai există saturare a traficului).



(a) Vehiculele încep să ajungă în intersecție la momentul de timp A, nu mai ajung după momentul B și părăsesc intersecția începând cu momentul C.



(b) Un ciclu complet - v, r și g reprezintă perioadele de verde, roșu și galben, E-V reprezintă direcția Est-Vest și N-S reprezintă direcția Nord-Sud

Figura 5. Diagramă explicativă pentru procesul de armonizare

Tabelul 1. Semnificația momentelor de timp pentru diferite direcții

Direcția (D)	A	B	C
Est	$E_s$	$E_0$	$T_4$
Vest	$V_s$	$V_0$	$T_4$
Nord	$N_s$	$N_0$	$T_2$
Sud	$S_s$	$S_0$	$T_2$

Vehiculele încep să sosească de pe direcția D la momentul  $D_s$  și nu mai sosesc după momentul  $D_0$ ; aici  $D = E, V, N$  sau  $S$  sunt cele patru direcții de deplasare. Orice vehicul oprit începe să se miște din nou pe direcția E-V la momentul  $T_4$  și pe direcția N-S la momentul  $(T_4 + T_2 - T_0)$ . Situația ideală este atunci când  $E_s = V_s = T_0$ ,  $E_0 = V_0 = T_1$  și  $N_s = S_s = T_2$ ,  $N_0 = S_0 = T_3$ .

Cu alte cuvinte, situația optimă este atunci când vehiculele încep să sosească exact la începutul perioadei de verde și nu mai sosesc după ce s-a terminat această perioadă, în ambele direcții. În general este necesară deplasarea timpului de pornire a ciclului  $T_0$  spre stânga ( $\Delta T_0 < 0$ ), dacă vehiculele sosesc înainte de a începe perioada de verde și spre dreapta ( $\Delta T_0 > 0$ ), dacă vehiculele sosesc după ce această perioadă a început.

Au fost efectuate o serie de experimente pentru a demonstra că armonizarea iterativă este convergentă (duce la un rezultat) și constituie o îmbunătățire semnificativă în raport cu regimul nearmonizat în care toate intersecțiile au același timp de pornire al ciclului.

### Optim local + armonizare = optim global

Să presupunem că regimul de control al fiecărei intersecții din rețeaua de străzi este optimizat cu privire la semnalizare și faze și că toate intersecțiile sunt armonizate. Să considerăm acum o intersecție arbitrară și să o numim centrală (notată cu C în figura 6.). Această intersecție centrală poate avea de la una până la patru intersecții adiacente, depinzând de topologia locală. Putem combina intersecția centrală și orice număr de intersecții adiacente ale sale într-o singură intersecție virtuală centrală pentru care poate fi calculat un optim local și poate fi calculat un regim de control armonizat, C\* a devenit intersecția virtuală combinată. Aspectul intersecției virtuale nu schimbă regimurile de control ale intersecțiilor neafectate. Vom continua să adăugăm intersecții adiacente intersecției centrale virtuale până când obținem una care combină toate intersecțiile rețelei și are un regim de control optim, acum global.

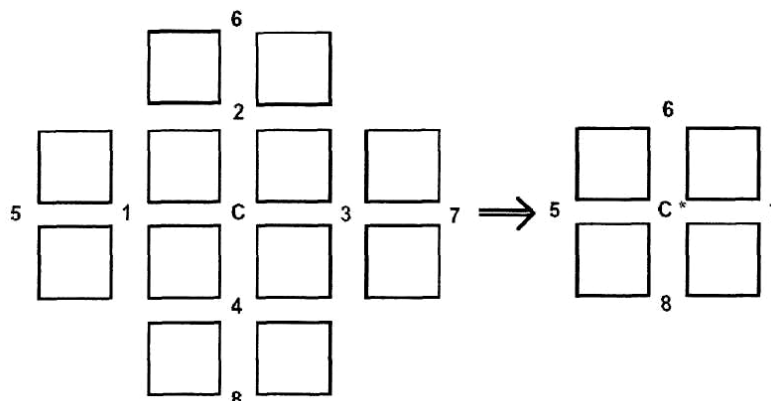


Figura 6. Ilustrație pentru demonstrația inductivă

## 5. Concluzii

Este cunoscut faptul că întârzierile din trafic provoacă disconfort și frustrare, accidente, pierderi de timp și de bani, creșterea consumului de combustibil și de poluare a aerului. Prin micșorarea întârzierilor, drumurile existente sunt mai eficient folosite, iar condițiile de mers ale șoferilor și situația ecologică sunt îmbunătățite. Din aceste motive, orice progres în această direcție reprezintă un câștig important economic și de mediu.

Sincronizarea semafoarelor din trafic pentru a furniza o progresie de-a lungul unei artere reduce substanțial întârzierile datorate opririlor și consumul de combustibil. Semnalul sincronizat trebuie să poată reacționa la volume de trafic și viteze diferite pe durata zilei (ex: orele de vârf și perioada din afara orelor de vârf) și la schimbări temporare ale volumelor de trafic care traversează intersecția și a celor ce virează.