

Carmen GHEORGHE

**MANAGEMENTUL TRAFICULUI
RUTIER, TELEMATICĂ ȘI TEHNOLOGII
EMERGENTE**



Editura
Universității
Transilvania
din Brașov

2026

EDITURA UNIVERSITĂȚII TRANSILVANIA DIN BRAȘOV

Adresa: Str. Iuliu Maniu nr. 41A
500091 Brașov
Tel.: 0268 476 050
Fax: 0268 476 051
E-mail: editura@unitbv.ro

Editură recunoscută CNCSIS, cod 81

ISBN 978-606-19-1848-5 (e-book)

Copyright © Autorul, 2026

Referenți științifici:

Prof. dr. ing. Adrian Ovidiu ȘOICA, Universitatea Transilvania din Brașov

Lect. dr. Ioan Drăgan, Universitatea de Vest din Timișoara

Cuprins

Prefață	3
1. Introducere în componentele traficului rutier.....	5
Tipologia drumurilor publice și funcționalitatea acestora	6
1.2. Factori determinanți ai traficului rutier	20
1.3. Categoriile legislative de vehicule	25
1.4. Standardizarea echivalării vehiculelor în analiza traficului	36
2. Metode de observare și înregistrare a fluxurilor rutiere	40
2.1. Principii generale și criterii de identificare a vehiculelor în trafic	40
2.2. Metode de investigare a traficului bazate pe observație umană	42
2.3. Echipamente și tehnologii pentru monitorizarea automată a fluxului rutier	46
2.3.1. Detecția vehiculelor prin senzori inductivi și principiul inducției electromagnetice	48
2.3.2. Detecția traficului prin plăci și celule de presiune de contact integrate în infrastructură.....	54
2.3.3. Detecția optică a vehiculelor utilizând tehnologii infraroșu și fotodiodă.....	56
2.3.4. Detecția radar pentru monitorizarea fluxului rutier	59
2.3.5. Detecția vehiculelor prin tehnologii laser.....	67
2.3.6. Detecția video și procesarea imaginilor pentru identificarea vehiculelor	70
2.3.7. Tehnologii emergente și soluții integrate pentru monitorizarea inteligentă a traficului rutier.....	81
2.3.8. Integrarea senzorilor avansați și a platformelor <i>Smart City</i> în managementul traficului.....	92
3. Metode statistice aplicate în analiza traficului rutier	100
3.1. Indicatori statistici fundamentali pentru evaluarea datelor de trafic	101
3.1.1. Măsuri de tendință centrală în analiza distribuției datelor.....	101
3.1.2. Măsuri de dispersie și variabilitate a datelor statistice	106
3.1.3. Indicatori statistici specifici aplicați în studiul traficului rutier.....	108
3.2. Gruparea datelor statistice și frecvențe caracteristice	111
3.3. Distribuții de probabilitate pentru variabile discrete în analiza traficului.....	114
3.4. Modele de distribuție pentru variabile continue aplicate în trafic.....	120
3.5. Criteriul de validare a distribuțiilor - χ^2	124
4. Fundamente teoretice ale traficului rutier	128
4.1. Cinematica deplasării vehiculului și parametrii microscopici ai traficului rutier	129
4.2. Cinematica plutonului de vehicule și parametrii macroscopici ai traficului rutier	138
4.3. Relații și diagrame fundamentale între parametrii macroscopici ai traficului.....	143

4.4. Analiza Origine – Destinație și integrarea în modelele macroscopice de trafic.....	149
4.5. Principii și metode de calcul ale capacității de trafic pentru arterele rutiere urbane..	154
5. Măsuri de calmare a traficului rutier.....	159
5.1. Clasificarea tipurilor de măsuri de calmare a traficului rutier.....	160
5.2. Efectele psihologice ale măsurilor de calmare a traficului asupra conducătorilor auto ..	166
6. Analiza caracteristicilor factorului uman participant la traficul rutier	169
6.1. Analiza caracteristicilor conducătorului auto	170
6.2. Analiza caracteristicilor și influenței pasagerului din dreapta.....	177
6.3. Analiza caracteristicilor și influenței pasagerilor din spate.....	181
6.4. Analiza caracteristicilor și influenței bicicliștilor.....	183
6.5. Analiza caracteristicilor și influenței utilizatorilor de trotinete electrice	187
6.6. Analiza caracteristicilor și influenței pietonilor – Participanți vulnerabili și factori activi în dinamica traficului rutier.....	192
Încheiere	201
Bibliografie.....	204

Prefață

Mobilitatea rutieră reprezintă una dintre componentele funcționării societății contemporane, influențând direct dezvoltarea economică, coeziunea socială și calitatea vieții în mediul urban și interurban. Creșterea constantă a volumelor de trafic, diversificarea modurilor de deplasare și presiunile tot mai accentuate asupra infrastructurii existente au transformat traficul rutier într-un sistem complex, dinamic și dificil de gestionat. În acest context, înțelegerea profundă a mecanismelor care guvernează circulația vehiculelor și a pietonilor devine o condiție pentru proiectarea, exploatarea și optimizarea sistemelor de transport.

Traficul rutier constituie o ramură fundamentală a ingineriei transporturilor, având ca obiectiv analiza și modelarea mișcării vehiculelor și pietonilor în cadrul rețelelor de transport. Prin intermediul său, se oferă un cadru științific pentru studiul interacțiunilor dintre vehicule, conducători auto și infrastructură, cu scopul îmbunătățirii eficienței, siguranței și sustenabilității sistemelor de transport. Principiile fundamentale care guvernează comportamentul traficului, precum viteza, densitatea și fluxul, reprezintă baza pe care inginerii și planificatorii își fundamentează deciziile privind proiectarea drumurilor, gestionarea congestiei și implementarea sistemelor de control al traficului.

Dezvoltarea ingineriei traficului rutier a fost strâns legată de evoluția transportului rutier și de necesitatea înțelegerii fenomenelor de congestie apărute odată cu urbanizarea accelerată și creșterea gradului de motorizare. Primele abordări sistematice au apărut la începutul secolului al XX-lea, când cercetătorii au început să investigheze relațiile dintre viteză, densitate și volum de trafic. Modelele fundamentale dezvoltate ulterior au oferit instrumente teoretice valoroase pentru descrierea comportamentului traficului, permițând formularea unor relații matematice capabile să surprindă dinamica circulației în diferite condiții de exploatare. Pe parcursul deceniilor, aceste modele au fost extinse și rafinate prin integrarea metodelor matematice și computaționale avansate, contribuind la dezvoltarea simulărilor de trafic și la evaluarea performanței sistemelor de transport.

Managementul traficului rutier s-a conturat ca domeniu distinct odată cu necesitatea aplicării acestor fundamente teoretice în practică, în scopul optimizării circulației pe drumuri și în rețele urbane complexe. Prin definiție, managementul traficului analizează comportamentul fluxurilor rutiere în condiții reale de exploatare, cu accent asupra situațiilor de supraîncărcare, instabilitate și congestie. Acesta se bazează pe concepte provenite din dinamica fluidelor și teoria sistemelor, adaptate specificului traficului rutier, unde comportamentul individual al utilizatorilor joacă un rol determinant. Fenomene precum atingerea capacității maxime a unei

artere, apariția undelor de șoc sau colapsul local al circulației sunt expresii ale complexității sistemului rutier modern și constituie puncte centrale de interes pentru managementul traficului.

În ultimele decenii, evoluția tehnologică a adus schimbări semnificative în modul de observare, analiză și gestionare a traficului rutier. Dezvoltarea sistemelor automate de detecție, a senzorilor avansați și a tehnologiilor de comunicații a permis colectarea unor volume fără precedent de date de trafic, în timp real. Apariția vehiculelor conectate și autonome a introdus noi dimensiuni în managementul traficului, facilitând comunicarea directă între vehicule și infrastructură și deschizând perspective pentru strategii de control cooperative și adaptive. Aceste transformări impun o reconsiderare a abordărilor clasice și evidențiază necesitatea unor soluții integrate, capabile să îmbine teoria consacrată cu tehnologiile emergente.

Totodată, complexitatea traficului rutier nu poate fi înțeleasă fără analiza rolului factorului uman. Comportamentul conducătorilor auto, al pietonilor și al celorlalți participanți la trafic influențează decisiv siguranța și eficiența circulației. Diferențele de percepție, reacție și decizie introduc un grad de variabilitate care face ca traficul să nu poată fi tratat exclusiv ca un sistem determinist. În acest context, integrarea analizei factorului uman în modelele și strategiile de management al traficului devine esențială pentru obținerea unor soluții realiste și acceptabile din punct de vedere social.

Prezentul volum oferă o abordare unitară și integrată a managementului traficului rutier, reunind fundamentele teoretice ale traficului, metodele moderne de observare și analiză, aplicațiile statisticii în evaluarea fluxurilor rutiere, precum și impactul tehnologiilor emergente și al factorului uman asupra sistemelor de transport. Structura reflectă această viziune integratoare, pornind de la elementele fundamentale ale traficului și evoluând către aspecte avansate de analiză, modelare și management.

Cartea se adresează studenților și cadrelor didactice din domeniul ingineriei transporturilor, cercetătorilor interesați de dinamica traficului rutier, precum și practicienilor implicați în proiectarea, exploatarea și administrarea infrastructurii rutiere. Prin combinarea rigurozității teoretice cu exemple și aplicații relevante, lucrarea urmărește să constituie atât un suport educațional, cât și o sursă de referință pentru activitatea profesională.

Într-un context marcat de provocări legate de congestie, siguranță rutieră și sustenabilitate, managementul traficului rutier devine un instrument pentru dezvoltarea unor sisteme de transport eficiente.

1. Introducere în componentele traficului rutier

Traficul rutier reprezintă un sistem complex și dinamic, alcătuit dintr-o serie de componente interdependente, al căror studiu detaliat este indispensabil pentru înțelegerea și gestionarea eficientă a fluxurilor de circulație. Acest sistem include, infrastructura rutieră, factorii determinanți care influențează comportamentul participanților la trafic, tipologia vehiculelor implicate și metodele standardizate utilizate pentru analiza și interpretarea datelor de trafic. Fiecare dintre aceste componente are un rol determinant în definirea caracteristicilor generale ale traficului, dar și în evaluarea performanțelor și limitărilor sistemului rutier.

În ceea ce privește infrastructura rutieră, tipologia drumurilor publice și funcționalitatea acestora constituie cadrul fizic și organizatoric în care se desfășoară procesul de transport rutier. Clasificarea drumurilor pe categorii tehnice și funcționale: de la autostrăzi, drumuri naționale și județene, până la drumuri comunale și străzi urbane, acestea reflectă varietatea obiectivelor de mobilitate, gradul de accesibilitate, parametrii de proiectare tehnică și condițiile de exploatare.

Funcționalitatea drumurilor, exprimată prin capacitatea acestora de a asigura un trafic fluent și sigur, depinde de elemente structurale (număr de benzi, lățimea carosabilului, calitatea îmbrăcămintei asfaltice) și de regimul de circulație impus (limitări de viteză, sensuri unice sau duble etc.). Astfel, tipologia drumurilor devine un factor determinant în stabilirea strategiilor de management al traficului și în realizarea planificărilor infrastructurale adecvate contextului local și regional.

Complementar, un rol fundamental în definirea și dinamica traficului rutier îl au factorii determinanți ai traficului, care includ un spectru larg de elemente externe și interne. Acești factori variază de la condiții meteorologice, condiții sezoniere și orare, până la aspecte socio-economice, demografice și tehnologice. De exemplu, creșterea economică, urbanizarea accelerată și modificările comportamentului consumatorilor influențează semnificativ volumul și compoziția traficului. Factorii temporali, precum orele de vârf sau zilele săptămânii, determină fluctuații caracteristice ale fluxurilor de vehicule. Înțelegerea acestor factori este indispensabilă pentru modelarea traficului, estimarea cererii de mobilitate și pentru implementarea unor măsuri eficiente de reglare și control al traficului.

În ceea ce privește elementele mobile ale sistemului rutier, categoriile legislative de vehicule constituie o componentă de bază, oferind un cadru normativ care clasifică vehiculele în funcție de caracteristicile lor tehnice, funcționale și de destinație conform cadrului european de omologare, stabilit prin Regulamentele (UE) nr. 168/2013 și (UE) 2018/858. Acest cadru include categorii precum L (vehicule cu două sau trei roți), M (autovehicule pentru transportul de persoane), N (autovehicule pentru transportul de marfă), O (remorci), precum și alte categorii specifice. Fiecare categorie are implicații distincte asupra circulației, influențând parametri precum viteza de deplasare, spațiul ocupat pe drum, capacitatea de încărcare și cerințele de

siguranță. Această clasificare este utilă nu doar pentru reglementările legale privind circulația rutieră, ci și pentru studiile statistice și analizele privind performanțele traficului.

În contextul analizei traficului rutier, o provocare majoră o reprezintă diversitatea flotei auto și impactul acesteia asupra interpretării și comparabilității datelor colectate. De aceea, standardizarea echivalării vehiculelor joacă un rol important în metodologia de analiză a traficului. Aceasta presupune atribuirea unor coeficienți de echivalare, care transformă diferitele tipuri de vehicule în unități de trafic echivalente cu un vehicul standard de referință (de regulă, autoturismul). Prin aplicarea acestor coeficienți, se poate evalua în mod unitar încărcarea infrastructurii și capacitatea de circulație, ținând cont de efectele diferite pe care le au vehiculele în funcție de masa, dimensiuni, performanțe dinamice și cerințe de siguranță. Standardizarea asigură astfel o bază comună pentru modelarea traficului, pentru proiectarea infrastructurii și pentru formularea politicilor de transport adaptate realităților mixte ale traficului contemporan.

Astfel că, o înțelegere aprofundată a traficului rutier presupune analiza integrată a infrastructurii, factorilor determinanți, tipologiei vehiculelor și metodologiilor standardizate de interpretare a datelor. Această abordare ajută la dezvoltarea unor soluții eficiente de management al traficului, care să răspundă nevoilor de mobilitate în condiții optime de siguranță, fluiditate și sustenabilitate.

1.1. Tipologia drumurilor publice și funcționalitatea acestora

Infrastructura rutieră reprezintă un element de bază al sistemelor de transport la nivel global, facilitând mobilitatea, comerțul și dezvoltarea economică. Clasificarea și caracteristicile acesteia variază semnificativ între diferite regiuni și țări, în funcție de factori precum nivelul de dezvoltare economică, densitatea populației și politicile naționale de transport. Conform datelor disponibile în anul 2023, rețeaua rutieră a României cuprinde aproximativ 86.336 km de drumuri, dintre care 41.653 km (48,2%) sunt modernizate, 20.956 km (24,3%) au îmbrăcăminte ușoară rutieră, 15.713 km (18,2%) sunt drumuri pietruite, iar 8.014 km (9,3%) sunt drumuri de pământ.¹

- Clasificarea infrastructurii rutiere la nivel mondial

La nivel global, infrastructura rutieră este, în general, clasificată în funcție de funcționalitate și capacitate, după cum urmează:

Autostrăzi (Motorways/Freeways): Drumuri cu acces controlat, proiectate pentru trafic de mare viteză și volume ridicate de vehicule. Acestea au, de obicei, separare fizică între sensurile de circulație și intersecții denivelate, asigurând fluxuri de trafic neîntrerupte, dar au și separare prin linie continuă de banda de urgență.

¹ Institutul Național de Statistică, *Lungimea căilor de transport la sfârșitul anului 2022*, p. 5.

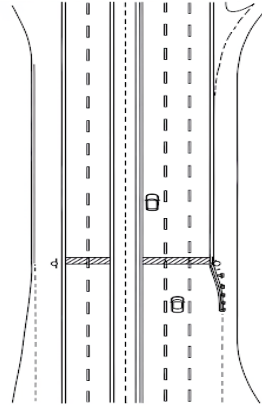


Figura 1.1. Autostrăzi

Drumuri naționale (*National Highways*): Artere principale care leagă orașe importante și regiuni, facilitând transportul interurban și comerțul național. Aceste drumuri pot avea intersecții la nivel și limite de viteză variabile, în funcție de condițiile locale.

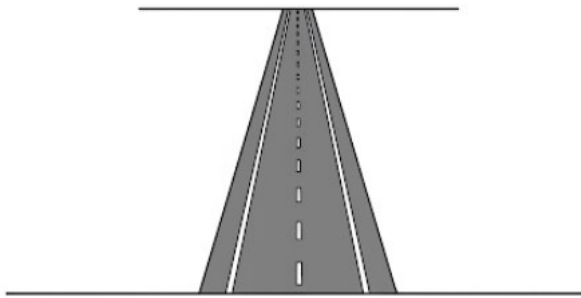


Figura 1.2. Drumuri naționale

Drumuri județene (*Regional Roads*): Conectează localități și zone de importanță regională, asigurând accesul la rețeaua națională de drumuri și sprijinind dezvoltarea economică regională.



Figura 1.3. Drum județean

Drumuri locale (Local Roads): Deservesc traficul local în interiorul comunităților, oferind acces direct la proprietăți rezidențiale, comerciale și industriale. Acestea au, de obicei, limite de viteză mai mici și capacități reduse comparativ cu drumurile de rang superior.



Figura 1.4. Drum local

- Clasificarea și caracteristicile infrastructurii rutiere în România

În România, infrastructura rutieră este clasificată în autostrăzi, drumuri naționale, județene și comunale, conform OG nr. 43/1997.²

Clasificarea se bazează pe importanța economică și socială a drumurilor, după cum urmează:

- Drumuri de interes național:

Autostrăzi - În România, autostrăzile se disting prin standarde tehnice înalte, esențiale pentru siguranța și fluiditatea traficului. Acestea se caracterizează printr-un număr minim de două benzi de circulație pe sens, fiecare având o lățime standard de 3,75 metri, adaptabil în funcție de intensitatea traficului. Banda de urgență, cu o lățime de 3 metri, este un element distinctiv, oferind un spațiu vital pentru vehiculele cu defecțiuni sau în situații de urgență. Separarea sensurilor de mers printr-un spațiu median, fie fizic, printr-un separator de beton, fie printr-un spațiu verde, previne coliziunile frontale, un aspect important pentru siguranță.

Indicatoarele rutiere de mari dimensiuni, amplasate strategic pentru a oferi timp de reacție conducătorilor auto, sunt un alt element definitoriu. Acestea includ indicatoare de presemnalizare a ieșirilor, de confirmare a direcției și a distanței până la localități importante, facilitând orientarea pe autostradă. Pantele reduse și curbele largi, cu o rază mare, asigură o conducere lină și constantă, contribuind la confortul călătoriei. Suprafața de rulare netedă și

² Guvernul României, *Ordonanța nr. 43/1997 privind regimul drumurilor*, republicată, cu modificările și completările ulterioare, art. 5. Disponibil la <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/11269>. Accesat la data de 10.07.2025.

antiderapantă optimizează aderența pneurilor, un factor pentru siguranță, în special în condiții meteorologice nefavorabile.

Împrejmuirea autostrăzii, un element de securitate important, împiedică accesul pietonilor, al animalelor și al vehiculelor neautorizate. Iluminatul, prezent pe anumite tronsoane, în special în zonele de intersecție sau în apropierea localităților, sporește vizibilitatea pe timp de noapte. Zonele de servicii, incluzând benzinării, parcări și restaurante, completează facilitățile oferite de autostradă, contribuind la confortul participanților la trafic pe parcursul călătoriilor lungi.



Figura 1.5. Indicator rutier de orientare pentru autostradă

Drumuri naționale europene (E) - Drumurile naționale europene (*E-roads*) din România, parte integrantă a unei rețele transeuropene mai vaste, sunt proiectate și construite conform unor standarde tehnice specifice, menite să asigure fluiditatea și siguranța traficului internațional. Acestea se disting prin anumite caracteristici tehnice, adaptate pentru a gestiona un volum ridicat de trafic și pentru a facilita conexiunile între diferite regiuni și țări.

În ceea ce privește numărul de benzi, drumurile naționale europene pot varia, având de obicei cel puțin două benzi pe sens, dar putând ajunge și la patru sau mai multe, în funcție de intensitatea traficului și de necesitățile specifice ale tronsonului respectiv. Lățimea standard a unei benzi de circulație este de 3,5 metri, asigurând un spațiu adecvat pentru majoritatea vehiculelor.

Indicatoarele rutiere, elemente pentru orientare și siguranță, sunt amplasate la distanțe regulate și sunt de dimensiuni mari, ușor de citit, pentru a oferi informații clare și precise conducătorilor auto. Acestea includ indicatoare de direcție, de distanță, de avertizare și de informare, adaptate standardelor europene pentru a facilita circulația internațională.

Platforma drumului este proiectată pentru a permite o viteză de circulație adecvată, de obicei între 90 și 100 km/h, dar aceasta poate varia în funcție de condițiile locale și de restricțiile specifice. Pantele și curbele sunt proiectate pentru a asigura o conducere lină și sigură, iar suprafața de rulare este netedă și rezistentă la trafic intens și la condiții meteorologice diverse.

În general, drumurile naționale europene nu au o bandă de urgență continuă, dar pot avea spații de oprire de urgență amenajate la intervale regulate, pentru a permite vehiculelor cu defecțiuni să staționeze în siguranță în afara benzii de circulație.



Figura 1.6. Indicator de orientare pentru drum național european

Drumuri naționale principale (DN) - Conectează capitalele de județ și alte orașe importante, jucând un rol în transportul interurban.



Figura 1.7. Indicator de orientare pentru drum național

Drumuri de interes județean (DJ) - Leagă localitățile de reședință de județ cu alte localități de importanță județeană sau cu rețeaua de drumuri naționale, sprijinind mobilitatea regională. Caracteristicile lor tehnice sunt reglementate de standarde specifice, adaptate pentru a susține un trafic moderat și variat.

Numărul de benzi pe un drum județean este, de obicei, de două benzi, câte una pe sens, dar poate fi și mai mare în zonele cu trafic intens. Lățimea unei benzi de circulație este, în general, de 3 metri, dar poate varia în funcție de categoria drumului și de condițiile locale.

Indicatoarele rutiere de pe drumurile județene sunt amplasate la distanțe regulate și sunt de dimensiuni adecvate, pentru a fi ușor de observat și de înțeles de către conducătorii auto. Acestea oferă informații despre direcții, distanțe, avertizări și alte detalii necesare pentru o călătorie sigură.

Platforma drumului este proiectată pentru a permite o viteză de circulație adecvată, de obicei între 70 și 90 km/h, dar aceasta poate varia în funcție de condițiile locale și de restricțiile specifice. Pantele și curbele sunt proiectate pentru a asigura o conducere lină și sigură, iar suprafața de rulare este adaptată la trafic moderat și la condiții meteorologice diverse.



Figura 1.8. Indicator de orientare pentru drum județean

○ **Drumuri de interes local:**

Drumuri comunale (DC): Conectează satele și comunele între ele sau cu drumurile județene și naționale, facilitând accesul la rețeaua rutieră principală. Numărul de benzi pe un drum comunal este, în general, de două, câte una pe sens, dar pot exista și excepții, în funcție de necesitățile locale și de configurația terenului. Lățimea unei benzi de circulație variază, de obicei, între 2,5 și 3 metri, fiind influențată de categoria drumului, de relief și de volumul de trafic estimat.

Indicatoarele rutiere pe drumurile comunale sunt prezente, dar, având în vedere specificul traficului, pot fi mai puțin numeroase și de dimensiuni mai mici decât pe drumurile de rang superior. Acestea au rolul de a semnaliza direcția spre localități, de a avertiza asupra unor pericole locale (curbe, pante, zone cu vizibilitate redusă) și de a oferi informații sumare despre distanțe.

Platforma drumului este proiectată pentru a permite o viteză de circulație adaptată condițiilor locale, de obicei între 50 și 70 km/h, dar aceasta poate fi și mai mică în zonele cu relief dificil sau în intravilanul localităților. Pantele și curbele sunt modelate pentru a asigura o circulație cât mai lină posibil, ținând cont de constrângerile terenului. Suprafața de rulare poate varia de la un drum pietruit la un drum asfaltat, în funcție de importanța drumului și de resursele disponibile.



Figura 1.9. Indicator de orientare pentru drum local

Drumuri urbane (străzi): Drumuri situate în interiorul localităților, asigurând circulația urbană și accesul la proprietăți și servicii locale.

Străzi de categoria I - Magistrale:

- **Rol:** Asigură legătura între marile zone ale orașului, preluând traficul de tranzit și de mare viteză.
- **Caracteristici:**
 - Număr mare de benzi de circulație (de obicei, 4 sau mai multe).
 - Sens unic sau dublu.
 - Trafic intens.
 - Viteză de circulație ridicată.
 - Pot include benzi dedicate pentru transportul în comun sau piste pentru biciclete.
 - Exemple: bulevarde importante, artere principale.

Străzi de categoria a II-a - De legătură:

- **Rol:** Fac legătura între străzile magistrale și cele colectoare, asigurând distribuirea traficului în interiorul cartierelor.
- **Caracteristici:**
 - Număr mediu de benzi de circulație (de obicei, 2-4).
 - Sens unic sau dublu.
 - Trafic moderat.
 - Viteză de circulație medie.
 - Pot include trotuare și spații verzi.
 - Exemple: străzi principale din cartiere, artere secundare.

Străzi de categoria a III-a - Colectoare:

- **Rol:** Asigură accesul la locuințe, instituții și alte obiective din interiorul cartierelor.
- **Caracteristici:**
 - Număr redus de benzi de circulație (de obicei, 1-2 pe sens).
 - Sens unic sau dublu.
 - Trafic redus.
 - Viteză de circulație scăzută.
 - De obicei, includ trotuare și pot avea spații de parcare.
 - Exemple: străzi secundare din cartiere, străzi de acces la blocuri sau case.

Străzi de categoria a IV-a - De folosință locală:

- **Rol:** Asigură accesul la proprietăți individuale (locuințe, curți interioare) și la zone cu trafic foarte redus.

- **Caracteristici:**
 - O singură bandă de circulație (uneori, cu sens unic).
 - Trafic foarte redus.
 - Viteză de circulație foarte scăzută.
 - Pot fi și pietonale sau semipietonale.
 - Exemple: alei, fundături, străzi de acces la case.

Pe lângă aceste categorii principale, există și alte tipuri de străzi, cum ar fi:

- Străzi pietonale: Destinate exclusiv pietonilor.
- Străzi semipietonale (*shared-space*): Permise atât pietonilor, cât și vehiculelor cu acces limitat.
- Străzi cu sens unic: Pentru a fluidiza traficul.
- Străzi cu benzi dedicate: Pentru autobuze, biciclete sau alte tipuri de vehicule.

Clasificarea străzilor este un proces complex, care ține cont de mai mulți factori, cum ar fi:

- Volumul de trafic: Numărul de vehicule care circulă pe stradă.
- Viteza de circulație: Viteza medie a vehiculelor.
- Funcția străzii: Rolul pe care îl are în rețeaua de transport.
- Tipul de zonă urbană: Zona rezidențială, comercială, industrială etc.

Conceptul *Shared Space* – spațiu comun pietoni–vehicule

Shared space sau spațiu urban partajat reprezintă o abordare modernă de proiectare a spațiilor publice în care se elimină barierele fizice și simbolice dintre diferitele categorii de utilizatori ai drumului: pietoni, bicicliști, utilizatori de trotinete și autovehicule. Conceptul propune coexistența și responsabilizarea reciprocă, în detrimentul segregării clasice (trotuare, borduri, semafoare, marcaje stricte).

Termenul a fost popularizat de Hans Monderman, inginer de trafic olandez, care a arătat că reducerea semnelor de circulație și încurajarea interacțiunii vizuale și a negocierii spontane determină un comportament mai precaut și mai cooperant din partea tuturor participanților.

Monderman susține că participanții la trafic tind să adopte un comportament responsabil atunci când infrastructura le transmite încredere și nu îi tratează ca pe potențiali contravenienți.³

³ Tom Vanderbilt, *Traffic: Why We Drive the Way We Do (and What It Says About Us)* New York: Alfred A. Knopf, 2008.



Figura 1.10. Zona partajată

Exemple europene reprezentative

1. Drachten (Olanda) – unul dintre primele orașe care a implementat pe scară largă shared space: peste 20 de intersecții fără semafoare. Rezultatul a fost reducerea cu 40% a accidentelor și o fluență sporită a traficului.⁴
2. Exeter și Brighton (Marea Britanie) – centrele urbane au fost remodelate pentru a stimula mersul pe jos și ciclismul. Semnalizarea minimală a contribuit la reducerea vitezelor și creșterea siguranței.⁵
3. Kassel și Bohmte (Germania) – au convertit zone centrale în spații partajate, eliminând semnele rutiere și înlocuind asfaltul cu pavaj uniform.⁶
4. Cluj-Napoca (România) – exemplu de implementare parțială a principiilor *shared space*:

⁴ „Shared space,” *Wikipedia*. Disponibil la https://en.wikipedia.org/wiki/Shared_space. Accesat la data de 05.01.2026

⁵ „Shared space,” *Wikipedia*, secțiunea „United Kingdom”. Disponibil la https://en.wikipedia.org/wiki/Shared_space. Accesat la data de 05.01.2026.

⁶ „Shared Space in Bohmte,” *Wikipedia*. Disponibil la https://de.wikipedia.org/wiki/Shared_Space_in_Bohmte. Accesat la data de 05.01.2026.

- Zona pietonală - str. Mihail Kogălniceanu (2023) este accesibilă autovehiculelor doar la nevoie, dar în principal destinată pietonilor și bicicliștilor, cu mobilier urban unificat și pavaj continuu.⁷



Figura 1.11. *Shared space* pe str. Mihail Kogălniceanu – Cluj – Napoca

Străzile realizate sub conceptul *Shared Space*, adică aceste spații partajate între vehicule, pietoni, bicicliști și alte forme de mobilitate, trebuie să îndeplinească o serie de caracteristici tehnice stabilite la nivel european pentru a asigura siguranța rutieră, coerența funcțională și calitatea spațiului urban. Aceste caracteristici nu sunt reglementate printr-un singur standard european unificat, dar se regăsesc în ghiduri tehnice, reglementări urbanistice și norme de bună practică precum:

- *Manual for Streets* (UK)
- *CROW Design Manual for Bicycle Traffic* (Olanda)
- *Nacto Urban Street Design Guide* (adaptată și în Europa de Vest)
- *Guidelines for Designing Shared Space* (EU project *Shared Space*)
- Recomandările PIARC și COST 358 – *Pedestrian Quality Needs*

Caracteristici tehnice de urmat pentru *Shared Space*

1. Viteză de circulație redusă (maxim 20-30 km/h)

Este condiția de bază pentru funcționarea unui spațiu partajat.

Se impune prin:

- Design geometric (curbe, îngustări, accese laterale)
- Amenajări vizuale (pavaj neuniform, texturi tactile)
- Eliminarea priorităților rigide → vehiculele „negociază” trecerea

⁷ UrbanizeHub, „De ce nu funcționează shared space în România.” Disponibil la <https://urbanizehub.ro/de-ce-nu-funcționeaza-shared-space-romania/>. Accesat la data de 12.12.2025.

2. Eliminarea barierelor fizice între moduri

Nu există borduri înalte, garduri sau semafoare pietonale.

- Trotuarele sunt la același nivel cu carosabilul (platformă comună)
- Delimitarea este vizuală sau tactilă: pavaje diferite, linii, mobilier urban
- Culoarele de bicicletă pot fi marcate discret, dar nu separat fizic

3. Semnalizare verticală minimă sau inexistentă

Se aplică principiul „fără semne → atenție mai mare”

- Se renunță la indicatoare de prioritate, treceri pietonale marcate
- Participanții la trafic colaborează vizual (contact vizual → decizie)

4. Materiale și texturi cu funcție comportamentală

Pavajul trebuie să transmită vizual „acesta nu este un drum obișnuit”

- Se folosesc dale sau piatră cubică, cu variații de culoare și formă
- Suprafețele tactilo-vizuale ghidează persoanele cu deficiențe de vedere
- Texturi diferite indică zone de traversare sau de staționare

5. Accesibilitate universală

Conform standardelor europene EN 17210/2021 privind accesibilitatea⁸

- Lipsa diferențelor de nivel sau a rampelor abrupte
- Mobilier urban ergonomic, spațiu de manevră pentru cărucioare
- Tactilitate și semnalizare auditivă acolo unde e necesar

6. Lățimi minime adaptate funcției multiple

Platforma trebuie să acomodeze vehicule, pietoni, bicicliști simultan

- 6–8 m este considerată lățimea minimă pentru o stradă locală cu funcție partajată
- Lățimi mai mari sunt permise doar dacă sunt fragmentate vizual și funcțional

7. Amenajări care favorizează interacțiunea

Se încurajează oprirea, staționarea, interacțiunea socială

- Bănci, copaci, jardiniere, mese, terase
- Prezența elementelor care încetinesc „natural” traficul motorizat
- Mobilierul este poziționat astfel încât să segmenteze spațiul fără a-l fragmenta

⁸ European Committee for Standardization, *Accessibility and Usability of the Built Environment – Functional Requirements (EN 17210:2021)* Brussels, CEN, 2021

8. Managementul traficului greu și al accesului temporar

Se limitează accesul vehiculelor grele (livrări, salubritate)

- Se folosesc sisteme retractabile de stâlpi sau control inteligent al accesului
- Orarul de acces este restricționat (de exemplu, doar între 6:00–10:00 AM)

9. Compatibilitate cu sistemele inteligente (*Intelligent Transportation Systems - ITS*)

Se pot integra senzori, semnalizare adaptivă, LED-uri în pavaj

- Detectarea pietonilor și bicicliștilor prin LiDAR (*Light Detection and Ranging*), radar, camere
- Informații pentru conducători auto prin panouri sau semnale luminoase

10. Evaluarea post-implementare

Standardele europene recomandă monitorizarea siguranței și utilizării

- Număr de incidente, interacțiuni conflictuale
- Creșterea traficului pietonal și a celui cu bicicleta
- Percepția de siguranță și confort a utilizatorilor (prin chestionare)

Tabel 1.1. Exemple europene relevante

Oraș	Zonă partajată emblematică	Observații
Haren (NL)	Strada principală <i>shared space</i>	Proiect pilot fără semne și borduri
Brighton (UK)	New Road	Pietonii au prioritate totală
Copenhaga	Ørestad și Nørrebro	Integrare cu piste și transport public
Cluj-Napoca	Str. Regele Ferdinand, Eroilor	Primele implementări cu spațiu comun, pavaj tactil și eliminare borduri

➤ Impactul asupra traficului:

- Reducerea vitezei medii

În lipsa semnalizării și a marcajelor direcționale, conducătorii auto devin mai precauți, reducând viteza și acordând mai multă atenție pietonilor.

- Scăderea numărului și gravității accidentelor

Studiile arată că în zonele de *shared space*, accidentele scad cu 30–50%, mai ales cele pietonale. Lipsa semnalelor implicite obligă la vigilență constantă.

- Îmbunătățirea fluenței generale

Deși pare contraintuitiv, eliminarea semafoarelor și a priorităților rigide permite negociere spontană și continuă, ceea ce reduce timpul de așteptare.

- Creșterea atractivității spațiului public

Zonele de *shared space* devin centre de interacțiune socială, cu rol economic (terase, comerț), turistic și de coeziune urbană.

➤ Limitări

- Nu se pretează zonelor cu trafic intens (>1000 vehicule/oră).
- Poate crea disconfort pentru persoane nevăzătoare sau cu mobilitate redusă (de aceea, se recomandă integrarea benzilor tactile de ghidare).
- Necesită cultură rutieră matură, educația rutieră fiind esențială pentru succesul modelului.

➤ Efecte în orașe din România (Cluj-Napoca, Oradea, Sibiu)

- Cluj-Napoca a redus viteza de tranzit în centrul istoric, a stimulat mersul pe jos și a încurajat conversia unor spații carosabile în alei pietonale.
- Sibiu (zona Pieței Mari) a devenit model pentru partajarea fluxurilor pietonale și turistice cu autovehiculele autorizate.
- Oradea a implementat *shared space* în Piața Unirii și străzile adiacente, cu succes în ceea ce privește mobilitatea pietonală.

Așadar, *shared-space* este o viziune urbană care reflectă o schimbare de paradigmă în proiectarea mobilității: de la infrastructură dictativă la interacțiune bazată pe responsabilitate și încredere reciprocă. Cu beneficii clare în siguranță, fluență și calitatea vieții urbane, acest model își găsește tot mai des locul în politicile de mobilitate ale orașelor inteligente, inclusiv în România.

Caracteristici ale infrastructurii rutiere

- Capacitatea de trafic este determinată de numărul de benzi, lățimea acestora și structura intersecțiilor.
- Viteza de proiectare este viteza maximă pentru care a fost proiectat drumul, influențată de factori precum raza curbilor, pantele și vizibilitatea.
- Tipul suprafeței de rulare poate varia de la asfalt și beton la suprafețe pietruite sau de pământ, influențând confortul și siguranța traficului.
- Elemente de siguranță include parapete de protecție, marcaje rutiere, semnalizare și iluminat, menite să reducă riscul de accidente.
- Facilități auxiliare precum stații de odihnă, parcări și centre de informare pentru conducători auto.

Tipologia drumurilor publice în Uniunea Europeană

La nivelul UE, rețeaua de drumuri este integrată prin intermediul rețelei transeuropene de transport (TEN-T), care include: Rețeaua centrală (*Core Network*), aceasta cuprinde cele mai importante rute care leagă principalele orașe și noduri economice ale UE și Rețeaua globală (*Comprehensive Network*) care completează rețeaua centrală, asigurând conectivitatea la nivel regional și local.

Normative și standarde specifice proiectării, construcției și întreținerii drumurilor publice

Atât în Statele Unite, cât și în Uniunea Europeană, există standarde și reglementări specifice care guvernează proiectarea, construcția și întreținerea drumurilor publice.

În Statele Unite ale Americii (SUA), Administrația Federală a Autostrăzilor (*Federal Highway Administration - FHWA*) stabilește standarde prin Manualul privind Dispozitivele Uniforme de Control al Traficului (*Manual on Uniform Traffic Control Devices - MUTCD*) și alte directive federale.

În Uniunea Europeană (UE), statele membre urmează directivele europene privind gestionarea siguranței infrastructurii rutiere, transpusă în legislațiile naționale.

În România, ca stat membru al UE, legislația națională este armonizată cu cea europeană, respectând directivele și standardele stabilite la nivel comunitar. De exemplu, Strategia Națională pentru Sisteme de Transport Inteligente (ITS) a fost elaborată în conformitate cu directivele UE, având ca scop implementarea și operarea ITS pe rețeaua națională de drumuri.

Standardele tehnice pentru drumurile naționale din România sunt stabilite prin diverse reglementări și norme, elaborate de Compania Națională de Administrare a Infrastructurii Rutiere (CNAIR) și aprobate de Ministerul Transporturilor. Acestea sunt actualizate periodic pentru a ține cont de evoluția tehnologiei, a materialelor de construcție și a cerințelor de siguranță rutieră.

Un exemplu utilizat în proiectarea drumurilor extraurbane este normativul privind proiectarea, construcția și modernizarea drumurilor (AND 527) care stabilește cerințele tehnice pentru proiectarea, construcția și modernizarea drumurilor, inclusiv a drumurilor naționale.⁹ Acesta acoperă aspecte precum geometria drumului, structura rutieră, semnalizarea, iluminatul și siguranța rutieră.

⁹ Compania Națională de Administrare a Infrastructurii Rutiere, *Normativ privind semnalizarea rutieră (AND 527)* București, CNAIR, 2010, p.5

Câteva exemple utilizate în proiectarea drumurilor urbane sunt:

- Codul Rutier (OUG 195/2002) – Acesta stabilește cadrul general privind circulația pe drumurile publice și include referiri la clasificarea străzilor.¹⁰
- Regulamentul de aplicare a Codului Rutier (HG 1391/2006) – acesta detaliază prevederile Codului Rutier și oferă informații mai specifice despre clasificarea și caracteristicile diferitelor categorii de străzi.¹¹
- Legea privind administrația drumurilor (OG 43/1997) – aceasta stabilește cadrul legal pentru gestionarea drumurilor publice, inclusiv a celor din zonele urbane.
- Regulamentele locale – în fiecare municipiu sau oraș există regulamente proprii care completează legislația națională și stabilesc criteriile specifice de clasificare a străzilor în funcție de particularitățile locale.
- Planurile Urbanistice Generale (PUG) – aceste documente stabilesc dezvoltarea urbană a localităților și includ hărți cu clasificarea străzilor.
- Planurile de Mobilitate Urbană Durabilă (PMUD) – aceste planuri analizează și propun soluții pentru îmbunătățirea transportului și a mobilității în zonele urbane, inclusiv prin optimizarea rețelei de străzi.

1.2. Factori determinanți ai traficului rutier

Factorii determinanți ai traficului rutier sunt variabile care influențează fluxul și dinamica circulației vehiculelor pe infrastructura rutieră. Acești factori sunt analizați în cadrul teoriei fluxurilor de trafic, care utilizează modele matematice în ingineria transporturilor.

- Factori legați de infrastructura rutieră

Infrastructura rutieră are un rol-cadru în determinarea performanței traficului, influențând atât capacitatea de transport a drumurilor, cât și siguranța și densitatea scăzută a vehiculelor pe arterele rutiere. Un prim factor determinant este capacitatea drumului sau arterei rutiere, definită ca numărul maxim de vehicule care pot circula pe o secțiune de drum într-un anumit interval de timp fără a genera congestie. Aceasta depinde de caracteristicile fizice ale drumului, dar și de tipologia traficului și comportamentul conducătorilor auto. O capacitate mai mare presupune un flux mai eficient al vehiculelor, reducând riscul apariției congestiei și întârzierilor care vin o dată cu aceasta.

¹⁰ Guvernul României, *Ordonanța de urgență nr. 195/2002 privind circulația pe drumurile publice*, republicată în Monitorul Oficial al României, cu modificările și completările ulterioare, art. 6.

¹¹ Guvernul României, *Hotărârea nr. 1391/2006 pentru aprobarea Regulamentului de aplicare a OUG nr. 195/2002 privind circulația pe drumurile publice*, republicată în Monitorul Oficial al României, cu modificările și completările ulterioare, art. 49.

Un alt element este lățimea și numărul de benzi de circulație. Drumurile mai late și/sau cu un număr mai mare de benzi permit o distribuție mai eficientă a vehiculelor și reduc conflictele între participanții la trafic. Un exemplu îl reprezintă autostrăzile, acestea având mai multe benzi pe sens, pot susține volume mari de trafic la viteze ridicate, în timp ce drumurile locale cu o singură bandă pe sens sunt predispuse la congestie în condiții de trafic intens, în special în cazul zonelor cu dezvoltare imobiliară în creștere.

Geometria drumului influențează, de asemenea, comportamentul traficului. Factori precum raza curbei, pantele și intersecțiile au o importanță deosebită în siguranța și viteza de deplasare. Curbele cu raze mici pot impune limitări de viteză pentru a asigura stabilitatea vehiculelor, în timp ce pantele abrupte pot afecta performanțele autovehiculelor grele și pot conduce la variații ale fluxului de trafic. De asemenea, intersecțiile, fie că sunt la nivel sau denivelate, pot reprezenta puncte sensibile unde se pot forma ambuteiaje sau se pot produce accidente.

Prezența benzilor de urgență contribuie la creșterea siguranței și la gestionarea incidentelor în trafic. Benzile de urgență permit intervenția rapidă a serviciilor de asistență în caz de accidente sau defecțiuni tehnice și asigură o cale suplimentară de evacuare în situații de urgență. În lipsa acestora, vehiculele oprite pe carosabil pot cauza blocaje majore și pot crește riscul de coliziuni.

Semnalizarea rutieră include atât marcajele rutiere, cât și indicatoarele și sistemele de semaforizare. Marcajele rutiere contribuie la menținerea ordinii în circulație, delimitând benzile și ghidând conducătorii auto, în timp ce indicatoarele oferă informații despre regimul de viteză, direcțiile de deplasare și alte aspecte relevante ale drumului. Semaforizarea corectă a intersecțiilor optimizează fluxul de trafic și minimizează conflictele între vehicule.

- Factori legați de caracteristicile traficului

Caracteristicile traficului reprezintă un ansamblu de variabile care definesc modul în care vehiculele circulă pe drumuri și interacționează între ele. Printre cei mai importanți factori se numără debitul de vehicule, densitatea traficului, viteza medie a vehiculelor, și compoziția traficului. Debitul de vehicule, definit ca numărul de vehicule care traversează o secțiune de drum într-o unitate de timp (uzual, vehicule pe oră, veh/h), este un indicator pentru evaluarea performanței unui drum. La valori scăzute, traficul este lejer, iar vehiculele pot circula fără restricții. Pe măsură ce debitul sau fluxul crește, interacțiunea dintre vehicule devine mai complexă, iar probabilitatea de congestie crește. În cazul în care fluxul depășește capacitatea drumului, se produce un fenomen de colaps al fluxului, care determină o scădere bruscă a vitezei și apariția întârzierilor semnificative

Densitatea traficului, care se referă la numărul de vehicule existente pe o anumită porțiune de drum într-un moment dat, exprimată în vehicule pe kilometru (veh/km). Densitatea traficului influențează direct nivelul de congestie: la valori scăzute, vehiculele se pot deplasa liber la viteze mari, în timp ce la valori ridicate, spațiul dintre vehicule devine insuficient, ceea ce poate duce la reducerea vitezei și la apariția blocajelor. Creșterea densității peste un anumit prag critic determină o pierdere a capacității de circulație a drumului, ceea ce duce la așa-numitele „valuri de congestie” sau „șocuri de trafic”.

Viteza medie a vehiculelor, care reprezintă valoarea medie a vitezelor tuturor autovehiculelor care traversează o anumită secțiune de drum într-un anumit interval de timp. Aceasta este influențată de reglementările legale, condițiile de drum, caracteristicile vehiculelor și comportamentul conducătorilor auto. De regulă, o viteză medie ridicată este corelată cu un trafic liber, însă, în condiții de densitate mare, viteza scade semnificativ, afectând mobilitatea și timpul de deplasare. În situații extreme, cum ar fi blocajele rutiere, viteza vehiculelor poate ajunge la zero.

Cei trei factori menționați, debitul, densitatea și viteza medie, reprezintă parametrii macroscopici ai traficului rutier, care caracterizează plutonul de vehicule de pe o arteră rutieră.

Un factor important în analiza traficului, dar care nu face parte din grupul parametrilor macroscopici ai traficului rutier, este compoziția acestuia, adică tipurile de vehicule care circulă pe un anumit segment de drum. Traficul este compus din autoturisme, vehicule grele (camioane, autobuze), motociclete, biciclete și chiar pietoni în anumite zone urbane. Fiecare tip de vehicul influențează diferit dinamica traficului. Camioanele și autobuzele necesită mai mult spațiu și au accelerații și frânări mai lente decât autoturismele, ceea ce poate genera încetiniri în fluxul general de trafic. De asemenea, prezența vehiculelor lente pe drumuri rapide poate crea discrepanțe de viteză între participanții la trafic, sporind riscul de coliziuni.

- Factori legați de comportamentul conducătorilor auto

Comportamentul conducătorilor auto are un rol primordial în dinamica traficului rutier, influențând atât siguranța circulației, cât și eficiența mobilității. Deciziile individuale, reflexele, atenția și respectarea regulilor de circulație determină modul în care traficul se desfășoară, influențând riscul de accidente, fluiditatea deplasărilor și formarea congestiilor. Printre cei mai importanți factori comportamentali care afectează traficul se numără timpul de reacție al conducătorilor auto, disciplina și obiceiurile de conducere, precum și nivelul de agresivitate sau precauție în trafic.

Un prim factor este timpul de reacție, semnificând intervalul necesar unui conducător auto pentru a percepe un stimul și a lua o decizie corespunzătoare, precum frânarea sau schimbarea direcției de mers. Timpul de reacție depinde de factori precum nivelul de atenție,

experiența conducătorului auto, starea fizică și psihică, dar și de condițiile externe (vizibilitate redusă, oboseală, consum de substanțe care afectează reflexele). În trafic intens, un timp de reacție mai mare poate duce la coliziuni în lanț sau la blocaje, deoarece conducătorii auto nu reușesc să adapteze viteza și distanța de siguranță la modificările rapide ale fluxului rutier.

Un alt factor determinant este disciplina și obiceiurile de conducere. Respectarea regulilor de circulație, utilizarea corectă a semnalizării și menținerea distanței corespunzătoare între vehicule sunt esențiale pentru prevenirea accidentelor și menținerea unui flux constant de trafic. Nerespectarea regulilor, cum ar fi schimbările bruște de bandă, lipsa utilizării semnalizării sau circulația cu viteză neadaptată condițiilor de drum, contribuie la formarea blocajelor și la creșterea riscului de incidente. De asemenea, obiceiurile culturale și educația rutieră influențează stilul de conducere. În unele regiuni, există o mai mare toleranță pentru încălcarea normelor rutiere, ceea ce poate afecta negativ siguranța traficului.

Nivelul de agresivitate sau precauție în trafic este, de asemenea, un aspect important al comportamentului conducătorilor auto. Un stil de conducere agresiv, caracterizat prin accelerări și frânări bruște, schimbări rapide de bandă și nerespectarea priorității, poate genera pericole pentru ceilalți participanți la trafic și poate duce la accidente. Pe de altă parte, un stil excesiv de precaut, cum ar fi circulația la viteze semnificativ mai mici decât limita legală sau ezitarea excesivă la intersecții, poate perturba fluxul de trafic și poate cauza congestii. Ideal, un trafic eficient necesită un echilibru între prudență și dinamism, astfel încât vehiculele să circule în mod predictibil și fluent.

- Factori legați de condițiile de mediu și meteo

Condițiile de mediu și meteo influențează traficul rutier, afectând atât siguranța circulației, cât și performanța infrastructurii rutiere. Factori precum precipitațiile, temperaturile extreme, vizibilitatea redusă și caracteristicile terenului pot determina variații semnificative în fluxul de trafic, viteza vehiculelor și riscul de accidente. Impactul acestora este resimțit în mod diferit în funcție de tipul infrastructurii, densitatea traficului și capacitatea autorităților de a gestiona situațiile meteorologice nefavorabile.

Factori climatici precum precipitațiile afectează traficul rutier, fie că este vorba de ploaie, ninsoare sau polei. Ploile abundente reduc coeficientul de frecare dintre pneuri și suprafața carosabilului, ceea ce duce la creșterea distanței de frânare și la riscul de acvaplanare. În condiții de ninsoare sau polei, aderența este și mai scăzută, ceea ce poate duce la pierderea controlului vehiculelor și la creșterea probabilității de coliziuni. În plus, acumularea de zăpadă pe carosabil îngreunează circulația și poate bloca anumite sectoare rutiere, afectând mobilitatea auto.

Vizibilitatea redusă cauzată de ceață, ploi torențiale sau ninsori abundente este un alt factor de luat în considerare în analiza traficului rutier. În astfel de condiții, conducătorii auto au dificultăți în perceperea obstacolelor, semnalizării rutiere și celorlalte vehicule, ceea ce crește riscul de accidente, în special pe drumurile cu viteze ridicate, precum autostrăzile. De asemenea, în tuneluri sau în zonele montane, unde ceața este frecventă, vizibilitatea limitată poate afecta semnificativ siguranța circulației, necesitând măsuri suplimentare, cum ar fi iluminarea artificială sau semnalizarea adaptivă.

Caracteristicile terenului și ale mediului înconjurător au, de asemenea, un impact semnificativ asupra traficului. Drumurile situate în zone montane sunt mai predispuse la alunecări de teren, avalanșe sau căderi de pietre, ceea ce poate duce la blocarea traficului și la necesitatea unor lucrări frecvente de întreținere. De asemenea, în zonele urbane, existența vegetației dense în apropierea drumurilor poate reduce vizibilitatea și poate favoriza apariția obstacolelor neașteptate, cum ar fi ramurile căzute sau acumulările de frunze umede care pot deveni alunecoase.

- Factori legați de infrastructura rutieră

Infrastructura rutieră, respectiv, caracteristicile geometrice ale drumurilor, starea tehnică a carosabilului, organizarea intersecțiilor și prezența elementelor auxiliare, precum semnalizarea rutieră și sistemele inteligente de gestionare a traficului, influențează în mod semnificativ fluxul de trafic și experiența utilizatorilor. O infrastructură bine proiectată și întreținută corespunzător contribuie la fluidizarea traficului și la reducerea riscului de accidente, în timp ce deficiențele în proiectare sau întreținere pot conduce la congestie, deteriorarea vehiculelor și creșterea ratei incidentelor rutiere.

Configurația geometrică a drumului este primul factor, aceasta include elemente precum lățimea benzii de circulație, razele curbilor, înclinarea pantei și existența rampelor de acces. Drumurile cu benzi înguste sau curbe strânse pot determina o reducere a vitezei și pot crește probabilitatea de coliziuni, în special în condiții de vizibilitate redusă. În schimb, autostrăzile și drumurile expres, proiectate pentru viteze mari și dotate cu separatoare mediane și benzi de urgență, asigură un nivel ridicat de siguranță și capacitate de trafic.

Calitatea suprafeței carosabilului este un al doilea aspect determinant pentru circulația vehiculelor. Un drum deteriorat, cu gropi, denivelări sau marcaje șterse, afectează confortul conducătorilor auto și siguranța rutieră. Gropile și fisurile din asfalt pot cauza daune vehiculelor și pot duce la manevre bruște de evitare, crescând riscul de accidente. De asemenea, suprafețele carosabile cu aderență scăzută, fie din cauza uzurii, fie din cauza materialelor de proastă calitate, pot contribui la pierderea controlului vehiculului, în special în condiții de ploaie sau

ninsoare. Întreținerea constantă și modernizarea infrastructurii rutiere sunt obligatorii pentru prevenirea acestor probleme.

Intersecțiile semaforizate, sensurile giratorii și pasajele denivelate influențează atât modul în care vehiculele interacționează, cât și viteza de deplasare. Intersecțiile semaforizate pot contribui la sistematizarea traficului, dar, dacă nu sunt optimizate corespunzător, pot genera timpi mari de așteptare și pot duce la congestii. Sensurile giratorii, utilizate frecvent în zonele urbane, au avantajul de a reduce riscul de coliziuni frontale și laterale, însă pot deveni puncte de blocaj în cazul unui trafic intens. Pasajele denivelate și viaductele contribuie semnificativ la separarea fluxurilor de trafic, reducând conflictele de circulație și îmbunătățind fluxul de trafic.

Semnalizarea rutieră și sistemele de ghidare au rolul de a informa și de a ghida participanții la trafic. Indicatoarele rutiere, marcajele pe carosabil și panourile electronice de informare trebuie să fie amplasate în locuri vizibile și să fie clar interpretate de către conducătorii auto pentru a preveni confuziile și accidentele. Lipsa unei semnalizări adecvate sau amplasarea incorectă a indicatoarelor poate duce la manevre riscante și la nerespectarea priorității de trecere. În prezent, tehnologiile inteligente de gestionare a traficului, precum semafoarele adaptative și sistemele de monitorizare video, contribuie la îmbunătățirea siguranței și la reducerea timpilor de așteptare în trafic.

1.3. Categoriile legislative de vehicule

Clasificarea vehiculelor conform legislației europene este o procedură necesară pentru uniformizarea reglementărilor privind omologarea, înmatricularea și exploatarea acestora pe drumurile publice. Directiva 2001/116/CE oferă cadrul legal pentru această clasificare, stabilind categoriile principale de vehicule, împărțite pe criterii tehnice și funcționale, în vederea asigurării unei legislații coerente la nivel comunitar.¹²

În acest sens există șase categorii de vehicule, fiecare având subcategoriile, în funcție de diverse caracteristici ale acestora, astfel:

Categoria L - Vehicule cu două sau trei roți și cvadricicluri

Categoria L include vehicule cu două sau trei roți și cvadricicluri, folosite predominant pentru transportul individual sau în scopuri recreaționale. Subcategoriile sunt:

- **L1** - Motociclete cu cilindree mică, inclusiv mopede (motociclete cu cilindree ≤ 50 cm³ sau putere maximă ≤ 4 kW).

¹² Comisia Europeană, *Directiva 2001/116/CE din 20 decembrie 2001 de adaptare la progresul tehnic a Directivei 70/156/CEE privind omologarea de tip a autovehiculelor și a remorcilor acestora*, anexa II.

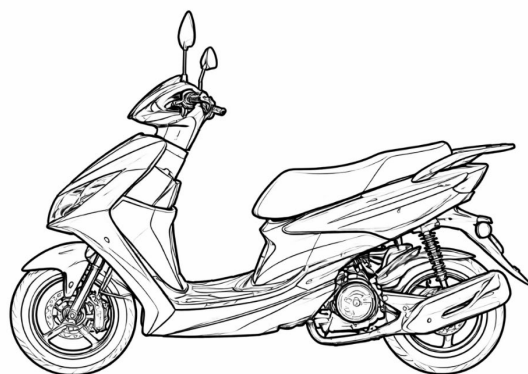


Figura 1.12. Moped cu capacitate de 50 cm³

- **L2** - Vehicule cu trei roți, cu sau fără cabină, destinate transportului unei singure persoane.



Figura 1.13. Triciclu electric

- **L3** - Motociclete cu două roți, fără cabină, cu cilindree > 50 cm³.

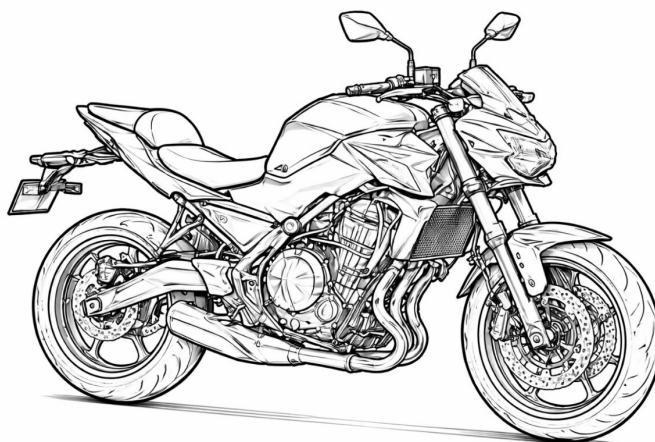


Figura 1.14. Motocicleta cu cilindree peste 50 cm³

- **L4** - Motociclete cu ataș

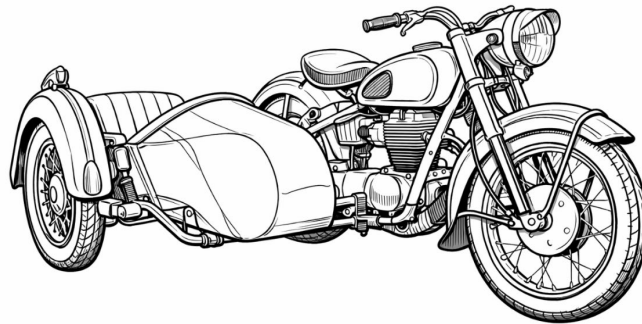


Figura 1.15. Motocicleta cu ataș

- **L5** - Vehicule cu trei roți, destinate transportului de pasageri (exemplu: trike-uri).

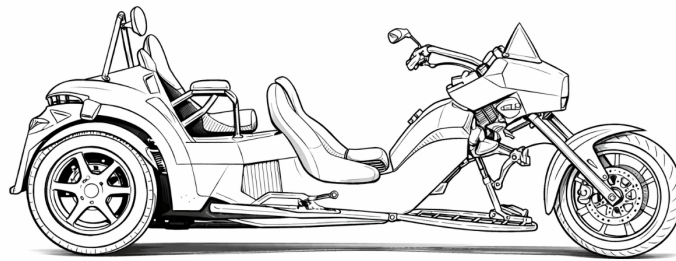


Figura 1.16. Vehicul cu trei roți – trike

Vehiculele din categoria L sunt supuse unor reguli specifice privind omologarea tehnică, echiparea și regimul de circulație, datorită caracteristicilor lor dinamice și de siguranță.

Categoria M - Vehicule destinate transportului de persoane

Categoria M cuprinde vehicule cu cel puțin patru roți, destinate transportului pasagerilor. Aceasta este împărțită în funcție de capacitatea de transport și masa maximă autorizată:

- **M1** - Autovehicule pentru transportul de persoane, cu maximum 8 locuri pe lângă scaunul conducătorului auto (ex.: autoturisme).



Figura 1.17. Autoturism

- **M2** - Vehicule cu mai mult de 8 locuri, având masa totală maximă autorizată de până la 5 tone (ex.: microbuze).



Figura 1.18. Microbuz

- **M3** - Vehicule cu mai mult de 8 locuri și masă totală maximă autorizată peste 5 tone (ex.: autobuze mari).

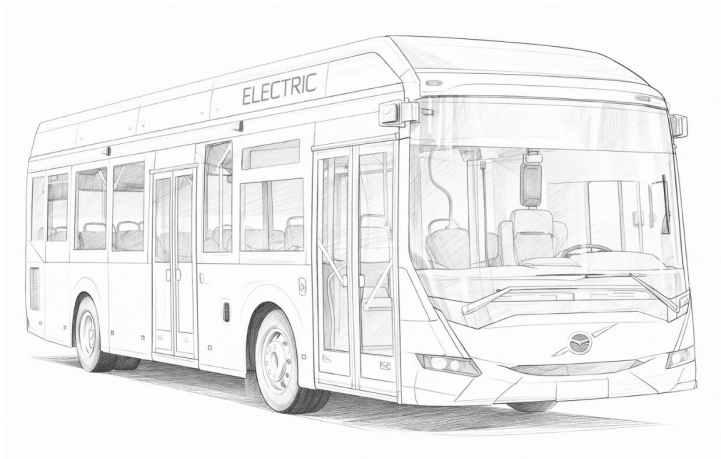


Figura 1.19. Autobuz urban

Această clasificare are implicații directe asupra cerințelor tehnice, condițiilor de operare și politicilor de management al traficului.

Categoria N - Vehicule destinate transportului de mărfuri

Categoria N include vehicule cu cel puțin patru roți, proiectate și construite pentru transportul mărfurilor. Aceasta se împarte după masa totală maximă autorizată:

- **N1** - Vehicule cu masa totală maximă autorizată $\leq 3,5$ tone (ex.: autoutilitare ușoare).



Figura 1.20. Autoutilitară ușoară

- **N2** - Vehicule cu masa totală maximă autorizată $> 3,5$ tone și ≤ 12 tone.



Figura 1.21. Autocamion 10 Tone

- **N3** - Vehicule cu masa totală maximă autorizată > 12 tone (ex.: camioane grele).



Figura 1.22. Camion 40 Tone

Această distincție este importantă pentru reglementările privind siguranța, impactul asupra infrastructurii și normele de mediu.

Categoria O - Remorci și semiremorci

Categoria O cuprinde remorci și semiremorci, clasificate în funcție de masa maximă autorizată a vehiculului:

- **O1** - Remorci cu masa maximă autorizată până la 0,75 tone.

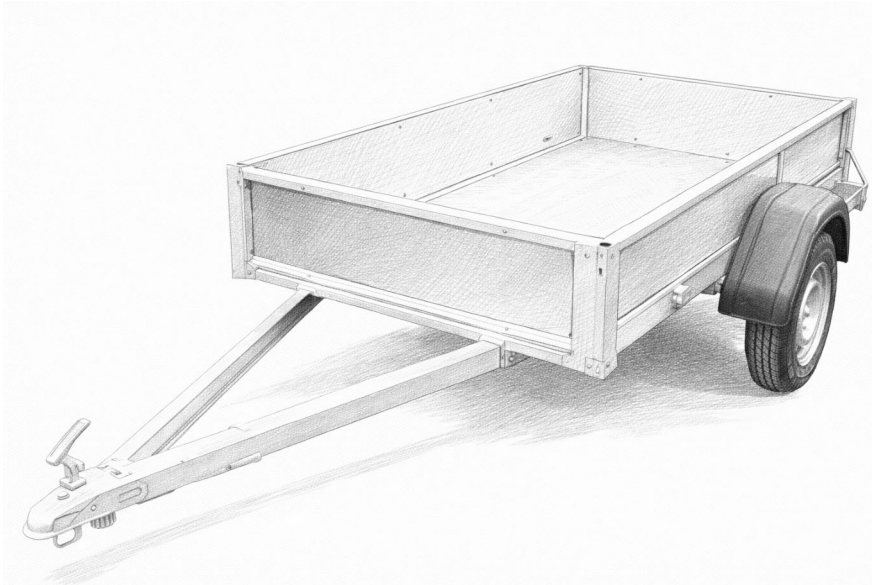


Figura 1.23. Remorca 0.75 Tone

- **O2** - Remorci cu masa maximă autorizată între 0,75 și 3,5 tone.

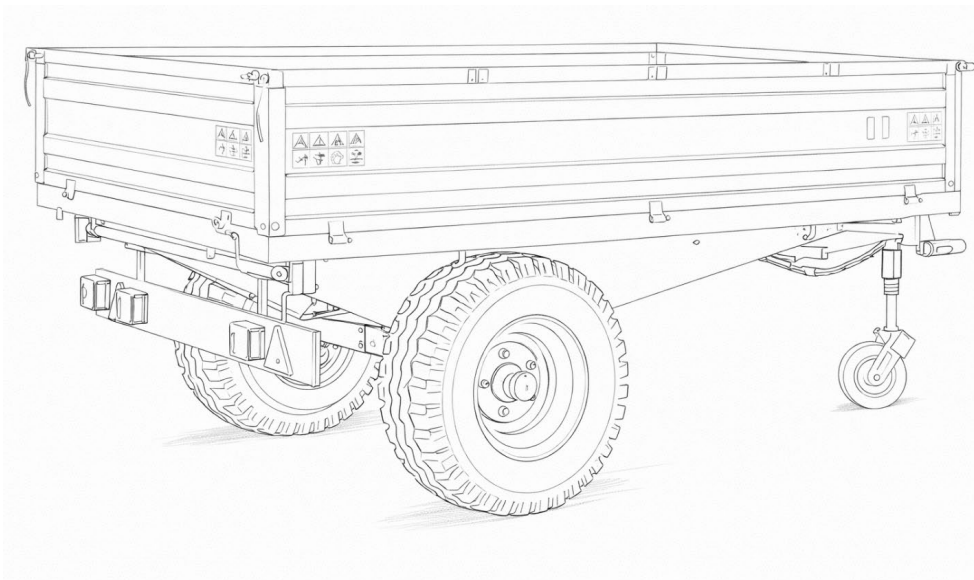


Figura 1.24. Remorca 2 Tone

- **O3** - Remorci cu masa maximă autorizată între 3,5 și 10 tone.

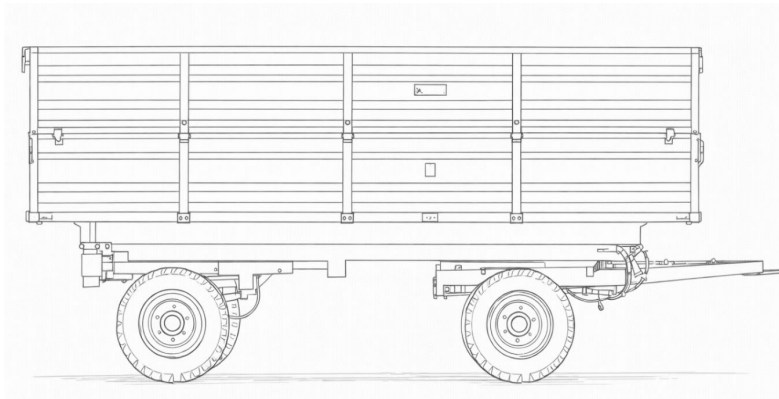


Figura 1.25. Remorca 6 Tone

- **O4** - Remorci cu masa maximă autorizată peste 10 tone.

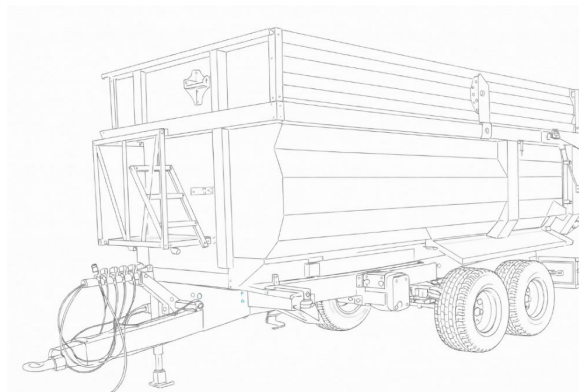


Figura 1.26. Remorca 15 tone CARGO

- **Semiremorca** este un vehicul tractat la care axa (axele) roților sunt situate în spatele centrului de greutate și care este echipat cu un sistem de cuplare ce permite transmiterea forțelor verticale și orizontale vehiculului tractor.

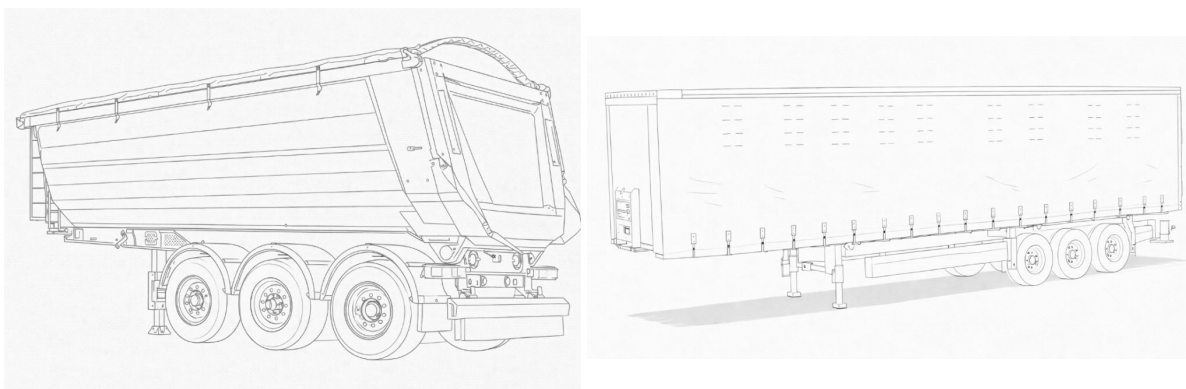


Figura 1.27. Semiremorci

Aceste categorii sunt importante pentru evaluarea capacității de transport, stabilitatea vehiculului și cerințele de siguranță în trafic.

Categoria T - Vehicule agricole și forestiere

Categoria T include vehiculele utilizate în agricultură și silvicultură, adaptate pentru teren accidentat și operațiuni specifice:

- Tractorul agricol (T) este destinat tractării sau alimentării utilajelor agricole și forestiere. Aceste vehicule au caracteristici specifice precum tracțiune integrală, viteză redusă și masă mare.



Figura 1.28. Tractor agricol

Reglementările privind circulația vehiculelor din categoria T sunt adaptate pentru a permite accesul acestora pe drumurile publice în condiții controlate. Tractoarele agricole și forestiere, încadrate în categoria T conform Directivei 2001/116/CE și reglementărilor naționale derivate (OUG nr. 195/2002 privind circulația pe drumurile publice, Codul Rutier din România), reprezintă vehicule specializate, proiectate preponderent pentru activități de exploatare agricolă și silvică, cu caracteristici constructive distincte față de vehiculele rutiere convenționale.

Caracteristicile tehnice specifice ale tractoarelor includ:

- viteză maximă constructivă redusă (în general 30–50 km/h),
- masă mare și distribuție particulară a sarcinii pe axe,
- tracțiune integrală sau parțială,

- echipare cu dispozitive de cuplare pentru remorci sau utilaje tractate,
- posibilitatea montării unor anexe și accesorii funcționale (pluguri, remorci speciale, buncăre etc.).

Data fiind destinația lor primară pe terenuri accidentate, legislația rutieră permite accesul tractoarelor pe drumurile publice numai în condiții clar reglementate, pentru a proteja atât siguranța rutieră, cât și infrastructura rutieră. Printre condițiile tipice se numără:

- Necesitatea de a se deplasa între parcele de teren, ferme, exploatații agricole sau puncte de lucru - deplasările pe drumurile publice trebuie să fie strict legate de activitatea agricolă sau silvică.
- Viteza redusă - tractoarele trebuie să circule cu viteze adaptate condițiilor de drum, în general mult mai mici decât limita legală generală pentru alte vehicule.
- Semnalizare corespunzătoare - tractoarele trebuie echipate cu sisteme de iluminare și semnalizare conforme cu reglementările rutiere (faruri, lumini de avarie, girofar galben intermitent).
- Marcaje reflectorizante și panouri de vehicul lent - este obligatorie montarea plăcii de semnalizare a vehiculelor lente (triunghi portocaliu cu contur roșu reflectorizant) pentru a avertiza ceilalți participanți la trafic.
- Remorci și utilaje remorcate - ansamblurile formate din tractor și remorci/utilaje trebuie să respecte cerințele de omologare, lungime maximă, lățime și sarcină pe axe.

În multe localități, există restricții orare pentru circulația tractoarelor pe drumurile principale, pentru a evita perturbarea fluxului de trafic la ore de vârf. În cazul drumurilor naționale sau europene intens circulate, circulația tractoarelor poate fi interzisă complet sau permisă doar pe anumite tronsoane, cu rute ocolitoare stabilite de autorități.

Categoria G - Vehicule *off-road*

Categoria G cuprinde vehicule specializate proiectate în principal pentru utilizarea în afara drumurilor publice, în condiții de teren accidentat, dificil sau specific unor activități industriale, agricole, militare ori forestiere. Aceste vehicule sunt concepute să ofere performanțe superioare în medii unde infrastructura rutieră este inexistentă sau insuficient dezvoltată.

Vehiculele din categoria G se disting prin următoarele particularități tehnice:

- Structură robustă și suspensii speciale, pentru a face față terenurilor dificile (noroi, pietriș, pante abrupte).
- Tracțiune integrală (4x4, 6x6, sau mai mult), pentru o tracțiune optimă pe suprafețe instabile.

- Anvelope speciale cu profil adânc, rezistente la perforații și uzură severă.
- Greutate și dimensiuni variabile, în funcție de tipul de vehicul și utilitatea sa, de la ATV-uri mici la vehicule militare blindate grele.
- Capacitate de remorcare și transport de sarcini mari în terenuri accidentate.
- Dotări tehnice specifice, precum sistem de protecție împotriva răsturnării, echipamente de comunicare și navigație *off-road*.

Tipuri de vehicule:

- Vehicule utilitare *off-road* folosite în exploatarea forestieră, minieră, agricultură montană sau în intervenții speciale (ex.: Land Rover Defender, UAZ, vehicule 4x4 specializate).



Figura 1.29. Vehicul de teren

- Vehicule militare tactice cu capacitate de traversare a terenurilor dificile și protecție sporită.

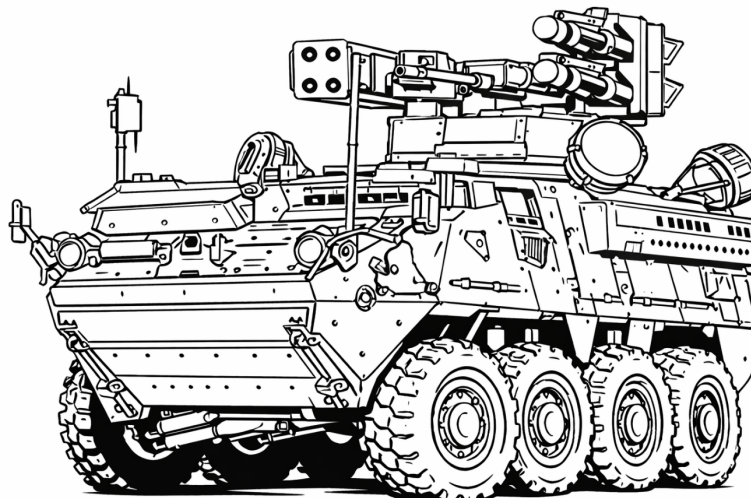


Figura 1.30. Vehicul militar

- ATV-uri (*All-Terrain Vehicles*) și SSV-uri (*Side-by-Side Vehicles*) utilizate în scop recreațional sau profesional.

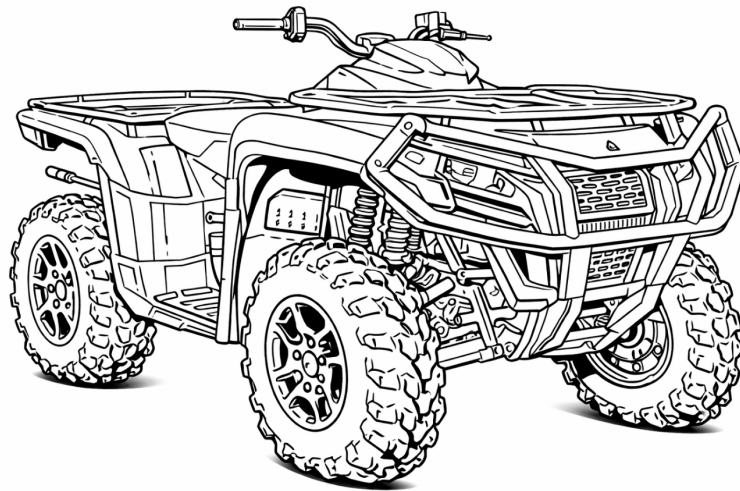


Figura 1.31. ATV

- Vehicule de intervenție în medii greu accesibile (salvatori montani, echipe de pompieri pentru zone accidentate).

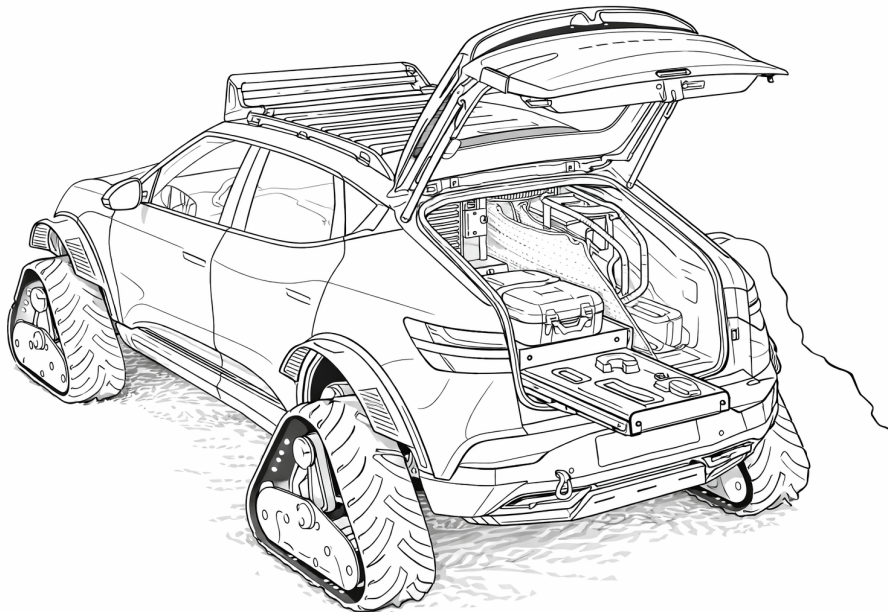


Figura 1.32. Vehicul de intervenție pe șenile

Deoarece aceste vehicule sunt concepute pentru utilizare preponderent *off-road*, reglementările privind circulația lor pe drumurile publice sunt stricte și adesea limitative:

- Acces restricționat sau interzis pe drumurile publice, cu excepția cazurilor speciale în care vehiculul este omologat și înregistrat pentru circulație rutieră.

- Pentru a circula legal pe drumurile publice, vehiculele categoria G trebuie să îndeplinească cerințele tehnice specifice omologării, inclusiv dotările de siguranță, emisii poluante și semnalizare.
- În multe state, vehiculele off-road care nu respectă standardele rutiere pot circula doar pe drumuri private, în exploatații agricole, forestiere sau în zone industriale.
- Pentru utilizarea în scopuri speciale (militare, de intervenție), reglementările pot prevedea derogări temporare sau condiții specifice privind circulația și accesul.

Importanța categoriei G în managementul traficului și planificarea infrastructurii

Deși vehiculele din categoria G nu sunt principalele participante în traficul rutier urban sau interurban, ele au un rol important în:

- Intervenții în zone greu accesibile, unde infrastructura rutieră este limitată sau deteriorată.
- Transportul de utilaje și materiale în terenuri accidentate, influențând indirect fluxurile de trafic prin activitățile conexe.
- Asigurarea mobilității în zone rurale sau montane, unde drumurile pot fi neasfaltate sau temporar inaccesibile.

Managementul traficului trebuie să țină cont de aceste particularități pentru a preveni conflictele de circulație, pentru a asigura siguranța participanților și pentru a proteja infrastructura rutieră existentă.

1.4. Standardizarea echivalării vehiculelor în analiza traficului

Analiza traficului rutier necesită o abordare standardizată pentru a putea interpreta și compara datele obținute din diverse surse și condiții. Unul dintre elementele fundamentale în această analiză este echivalarea vehiculelor, proces ce constă în transformarea diverselor tipuri de vehicule în unități standardizate, denumite vehicule etalon. Această metodă permite uniformizarea și agregarea datelor privind fluxurile de trafic, facilitând astfel evaluarea impactului diferitelor categorii de vehicule asupra infrastructurii rutiere, siguranței circulației și performanței generale a rețelei de transport.

Standardizarea echivalării vehiculelor este un pas important pentru a corela efectele specifice ale fiecărui tip de vehicul, luând în considerare variabile precum dimensiunea, masa, dinamica de deplasare și capacitatea de încărcare. Prin adoptarea unor coeficienți de echivalare bine definiți, este posibilă integrarea în analizele statistice a vehiculelor cu caracteristici diverse, de la autoturisme și motociclete, până la vehicule grele de transport marfă sau autovehicule speciale.

Importanța acestui proces rezidă nu numai în obținerea unor date comparabile și relevante pentru cercetarea și planificarea traficului, dar și în fundamentarea deciziilor de management și optimizare a circulației rutiere. Astfel, standardizarea echivalării vehiculelor constituie o premisă indispensabilă pentru elaborarea unor modele predictive corecte și pentru implementarea unor strategii eficiente de control și reglare a traficului.

În acest context, subcapitolul de față va aborda principiile și metodele utilizate în procesul de echivalare a vehiculelor, evidențiind criteriile de clasificare, coeficienții aplicabili și relevanța lor în cadrul analizelor statistice și operaționale ale traficului rutier.

Procesul de echivalare se bazează pe determinarea unor coeficienți de echivalare, care reflectă impactul relativ al fiecărui tip de vehicul asupra traficului comparativ cu o unitate de referință, denumită vehicul echivalent cu un autoturism (Vehicul Echivalent Autoturism – VEA). De regulă, autoturismul este considerat ca fiind unitatea de bază, având coeficientul de echivalare egal cu 1.

Coeficienții de echivalare variază în funcție de caracteristicile tehnice ale vehiculelor și de efectele acestora asupra traficului, cum ar fi: dimensiunile, masa, accelerația, comportamentul în trafic și gradul de influență asupra capacității drumului. De exemplu, un autobuz sau un camion greu va avea un coeficient de echivalare mult mai mare decât o motocicletă, reflectând atât consumul mai ridicat de spațiu pe drum, cât și impactul asupra capacității și siguranței traficului.

Valorile de trafic sunt transformate în vehicule etalon conform Normativului pentru determinarea traficului de calcul pentru proiectarea drumurilor.¹³

Tabel 1.2. Coeficienți de echivalare ai vehiculelor fizice în vehicule etalon

Nr. crt.	Grupa de vehicule	Coeficient de echivalare
1	Biciclete, motorete, scutere, motociclete	0.5
2	Autoturisme, microbuze, autocamionete, cu sau fără remorcă	1.0
3	Autocamioane și derivate cu 2-4 osii	2.5
4	Autovehicule articulate	3.5
5	Autobuze	2.5
6	Tractoare și vehicule speciale	2.0
7	Remorci la autocamioane si tractoare	1.5
8	Vehicule cu tracțiune animală	3.0

¹³ Ministerul Transporturilor, *AND 584-2002*, cap. 3

Acești coeficienți pot varia în funcție de contextul local, tipul drumului și scopul analizei, fiind determinați prin studii statistice, metode empirice sau modele de simulare a traficului.

Aplicarea corectă a acestor coeficienți în analiza datelor de trafic permite transformarea fluxurilor mixte într-un flux unitar, exprimat în vehicule echivalente autoturism, facilitând astfel comparabilitatea și interpretarea statistică.

Studiu de caz privind echivalarea vehiculelor pe drumurile publice

Pentru a ilustra aplicabilitatea practică a conceptului de echivalare a vehiculelor, acest subcapitol prezintă un studiu de caz realizat pe un sector reprezentativ al rețelei de drumuri publice. Studiul de caz urmărește să evidențieze modul în care datele de trafic, colectate prin metode specifice, pot fi transformate prin procesul de echivalare în vehicule etalon, facilitând astfel analiza cantitativă și calitativă a fluxurilor rutiere.

Prin analiza detaliată a datelor colectate referitoare la tipologia vehiculelor, inclusiv clasificarea acestora pe categorii (de exemplu, autovehicule ușoare, grele, remorci), se poate înțelege modul în care fiecare categorie contribuie distinct la utilizarea și încărcarea infrastructurii rutiere. Această clasificare este importantă pentru identificarea caracteristicilor specifice ale fiecărui tip de vehicul, cum ar fi masa, dimensiunile, comportamentul dinamic și cerințele privind spațiul de deplasare.

Distribuția vehiculelor pe intervale orare evidențiază variațiile temporale ale traficului, reflectând astfel fluctuațiile specifice de dimineață, prânz sau seară, perioade critice pentru gestionarea fluxurilor rutiere. Prin analizarea acestor intervale, se poate identifica corelația dintre tipul și numărul de vehicule prezente și capacitatea efectivă a drumului, care nu este constantă pe parcursul zilei.

Un element central al studiului îl constituie coeficienții de echivalare, parametri tehnici utilizați pentru a transforma unitățile de trafic reprezentate de vehicule diverse în echivalenți ai unui vehicul standard (de regulă, un autoturism). Acești coeficienți sunt fundamentali pentru o evaluare corectă și realistă a încărcării infrastructurii rutiere, deoarece iau în considerare diferențele majore în impactul asupra traficului produse de diverse tipuri de vehicule, precum camioanele grele, autobuzele sau remorcile.

Analiza evidențiază că utilizarea coeficienților de echivalare adecvați permite modelarea precisă a efectelor diferitelor categorii de vehicule asupra capacității și performanței drumurilor, prevenind subestimarea sau supraestimarea gradului de utilizare și uzură a infrastructurii.

Metodologie

Pasul 1 – Locația studiului: Sectorul analizat este un tronson urban al unui drum național cu trafic mixt, cu prezența autoturismelor, vehiculelor comerciale ușoare, autobuzelor și motocicletelor.

Pasul 2 – Colectarea datelor: Datele au fost culese prin metode manuale pe parcursul a 7 zile consecutive, acoperind toate intervalele orare de activitate.

Pasul 3 – Clasificarea vehiculelor: Vehiculele au fost clasificate conform legislației în categorii L, M, N și O, iar pentru fiecare categorie s-au determinat coeficienții de echivalare conform AND 584-2002.

Pasul 4 – Echivalarea: Fluxurile de trafic au fost convertite în vehicule etalon (Vt) prin multiplicarea volumului fiecărui tip de vehicul cu coeficientul corespunzător.

Tabelul 1.3. Echivalarea vehiculelor - Exemplu

Tip vehicul	Volum măsurat (Veh/h)	Coeficient echivalare	Volum echivalat (Vt/h)
Motociclete	6	0.5	3
Autoturisme	128	1	128
Autobuze	15	2.5	37.5
Autocamioane	3	2.5	7.5
Troleibuze articulate	7	3.5	24.5
Total vehicule	159		200.5

Pasul 5 – Analiza rezultatelor

Transformarea volumului total de vehicule în volum echivalat indică o încărcare suplimentară a infrastructurii care depășește simpla sumă a numărului de vehicule. Astfel, deși autoturismele reprezintă majoritatea numerică, impactul vehiculelor grele și autobuzelor asupra traficului este mult mai semnificativ, generând o încărcare echivalentă cu 41.5 [Vt/h] suplimentare față de simpla lor numerotare.

Această analiză indică necesitatea considerării coeficienților de echivalare în planificarea traficului pentru a preveni subestimarea impactului vehiculelor mari asupra capacității și siguranței drumurilor. De asemenea, echivalarea permite estimarea corectă a indicatorilor de performanță, cum ar fi viteza medie și densitatea traficului, în vederea implementării unor măsuri eficiente de optimizare.

Exemplul practic servește drept suport pentru deciziile de management al traficului și planificarea investițiilor în infrastructură, precum și pentru modelarea predictivă a scenariilor viitoare de trafic.

2. Metode de observare și înregistrare a fluxurilor rutiere

Observarea și înregistrarea fluxurilor rutiere reprezintă una dintre etapele inițiale considerate în analiza și gestionarea traficului, având rolul de a furniza date primare pentru evaluarea performanței rețelelor de transport. În contextul dezvoltării accelerate a infrastructurilor urbane și al creșterii continue a mobilității, aplicarea unor metode precise și adaptate de monitorizare devine o condiție primară pentru fundamentarea deciziilor de management al traficului.

Prin utilizarea unor tehnici variate, de la metode manuale bazate pe observația directă și implicarea factorului uman, până la sisteme automatizate de detecție și colectare a datelor, specialiștii pot obține informații detaliate referitoare la parametrii de trafic, comportamentul participanților la trafic și caracteristicile de circulație ale arterelor rutiere.

În cadrul acestui capitol sunt prezentate criteriile de detecție a vehiculelor, tipologia echipamentelor utilizate pentru colectarea automată a datelor, precum și avantajele și limitările fiecărei metode în funcție de contextul de aplicare. De asemenea, sunt evidențiate implicațiile calității și preciziei datelor asupra acurateții analizelor ulterioare privind capacitatea, nivelul de serviciu și optimizarea fluxurilor de trafic.

Prin aprofundarea metodelor de observare și înregistrare, inginerii de trafic și cercetătorii pot dezvolta modele realiste, implementa soluții de calmare a traficului și propune măsuri sustenabile pentru creșterea siguranței și eficienței rețelelor rutiere.

2.1. Principii generale și criterii de identificare a vehiculelor în trafic

Identificarea și detecția vehiculelor reprezintă un proces în cadrul activităților de monitorizare, analiză și management al traficului rutier, constituind baza oricărei evaluări cantitative și calitative a fluxurilor de circulație. Din perspectiva ingineriei de trafic, definirea clară a criteriilor de identificare presupune stabilirea parametrilor observați, a tehnologiilor utilizate și a condițiilor de mediu care pot influența precizia măsurătorilor.

Principiile generale de detecție se fundamentează pe relația directă dintre caracteristicile fizice ale vehiculului, anume forma, masa, materialul constructiv și semnătura electromagnetică, dar și posibilitățile de detecție a acestora prin intermediul diverselor tipuri de senzori și echipamente.

Detecția corectă a vehiculelor implică recunoașterea individuală a acestora în flux, distincția între clasele de vehicule (autoturisme, vehicule grele, motociclete, biciclete etc.) și, după caz, evaluarea unor atribute suplimentare cum ar fi viteza instantanee, lungimea, direcția de deplasare sau timpul și spațiul intervehicular.

Criteriile de identificare pot fi grupate în două mari categorii: criterii statice și criterii dinamice.

- **Criteriile statice** vizează atributele intrinseci ale vehiculului, cum ar fi gabaritul, masa totală maximă autorizată, forma geometrică a caroseriei sau tipul de propulsie. Acestea sunt importante în clasificarea vehiculelor conform normativelor și standardelor legislative (ex. clasificarea M, N, O, L, T, G).
- **Criteriile dinamice** se referă la parametrii de circulație măsurabili în timp real: viteză (V_i – km/h), accelerație, traiectorie și interacțiunea cu alte vehicule sau infrastructura rutieră (Figura 2.1.)

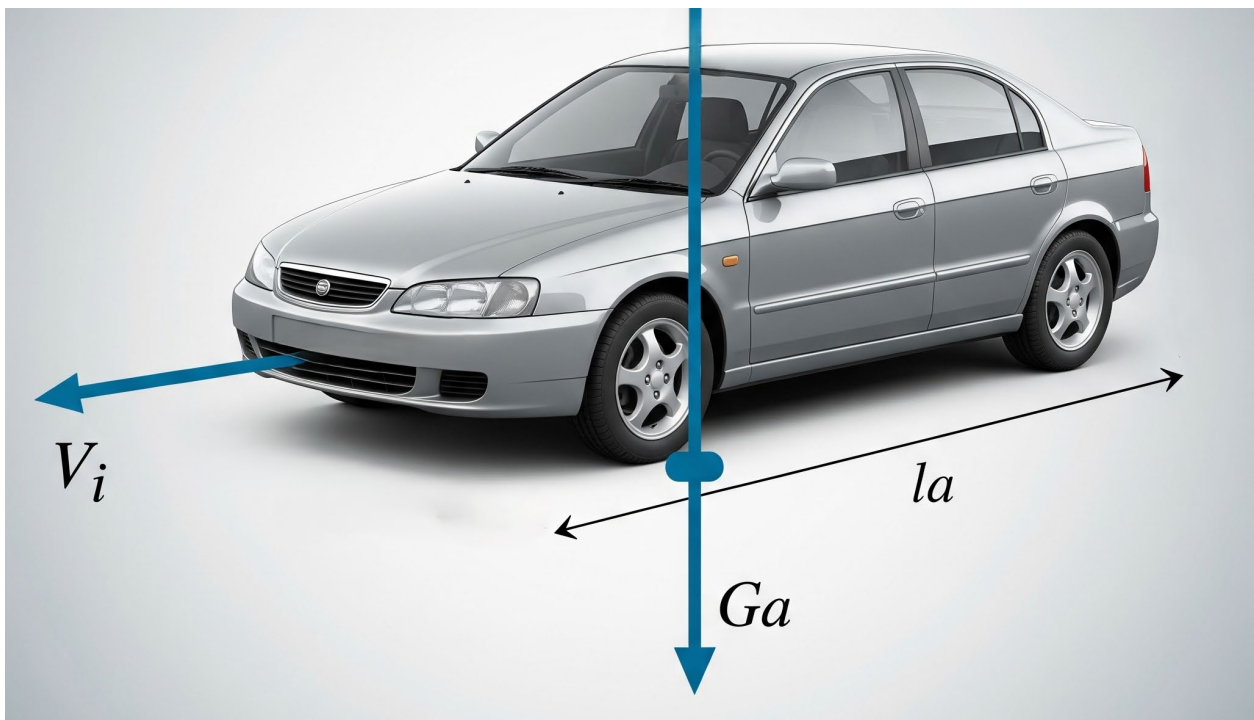


Figura 2.1. Elemente de caracterizare a vehiculului singular în trafic: V_i – viteza instantanee [km/h]; G_a – greutatea autovehiculului [N]; l_a – lungimea vehiculului [m]

Alegerea criteriilor adecvate depinde de scopul investigației și de nivelul de detaliu necesar: detecția simplă pentru numărarea vehiculelor, analiza comportamentului de deplasare, estimarea capacității drumului sau implementarea unor sisteme avansate de management al traficului. În plus, factori precum condițiile meteorologice, luminozitatea și densitatea traficului pot influența semnificativ performanța echipamentelor de detecție, motiv pentru care selecția metodologiei trebuie să fie fundamentată pe evaluări tehnice riguroase.

Astfel că, stabilirea unor principii generale coerente și a unor criterii tehnice de identificare precise contribuie direct la creșterea calității datelor colectate, oferind suport fiabil pentru elaborarea de studii de capacitate, optimizarea fluxurilor de trafic și fundamentarea strategiilor de management integrat al rețelelor rutiere. Datele colectate corect sunt utilizate ulterior în calcule de capacitate, atât pentru artere rutiere, cât și pentru intersecții, iar mai apoi sunt integrate în modelări și simulări în areal, utilizând diverse programe specializate în modelarea și simularea traficului rutier.

2.2. Metode de investigare a traficului bazate pe observație umană

Metodele de investigare a traficului rutier fundamentate pe observația directă umană constituie una dintre cele mai vechi și mai utilizate tehnici de colectare a datelor de circulație. În ciuda avansului tehnologic și a proliferării sistemelor automate de detecție, observația umană rămâne actuală în cercetarea traficului rutier, mai ales în contexte unde infrastructura tehnică este limitată sau unde este necesară o validare calitativă a datelor obținute prin mijloace automatizate.

Observația umană implică monitorizarea și înregistrarea directă a comportamentului participanților la trafic, a fluxului de vehicule și a condițiilor de circulație într-un punct fix sau de-a lungul unui sector de drum. Observatorii umani pot prelua roluri multiple: de la simpla numărare a vehiculelor și clasificarea acestora, până la înregistrarea unor variabile complexe precum tiparele de traversare a pietonilor, comportamentul în intersecții, respectarea semnalizării sau interacțiunile conflictuale.

Aceste metode sunt preferate în situațiile unde precizia tehnică a senzorilor poate fi compromisă de factori externi, cum ar fi condițiile meteo extreme, traficul dens cu vehicule foarte apropiate, sau atunci când se investighează elemente calitative dificil de cuantificat prin senzori, de exemplu comportamente de conducere agresivă, încălcări ale regulilor de prioritate, sau utilizarea benzii dedicate.

Metodele bazate pe observație umană pot fi împărțite în:

- Observație directă punctuală, unde operatorul staționează într-o locație fixă și colectează date (ex.: numărarea vehiculelor pe benzi distincte într-o intersecție).
- Observație mobilă, unde observatorul însoțește fluxul de trafic (ex.: vehicul de urmărire).
- Observație participativă, unde observatorul face parte din traficul studiat, colectând date subiective (ex.: anchete de tip conducător auto observator).

Printre cele mai comune tehnici se numără:

- Numărarea manuală a vehiculelor (vehicul-oră, vehicul-km).
- Clasificarea pe tipuri de vehicule (ușoare, grele, speciale).
- Numărarea conflictelor la intersecții.
- Studiul comportamentului pietonal.
- Înregistrarea vitezei medii cu ajutorul reperelor fixe și cronometrelor manuale.

Instrumentarul poate include simple fișe de observație, formulare standardizate, cronometre, tabele tipărite, contoare mecanice portabile și uneori camere video folosite doar ca suport vizual de validare.

Calitatea datelor colectate prin observație umană depinde de nivelul de instruire al operatorului, de claritatea instrucțiunilor de înregistrare și de durata sesiunii de observație. Pentru a minimiza erorile, este recomandată rotația observatorilor și validarea încrucișată a datelor.

Metoda se aplică cu precădere în evaluarea:

- Fluxului de vehicule pe intersecții aglomerate unde sistemele automate sunt absente.
- Analizelor preliminare pentru proiecte de reabilitare a infrastructurii.
- Studiilor de impact pentru modificări de reglementare a circulației.
- Anchetelor de comportament rutier și studii de siguranță.

Printre avantajele metodei se numără costurile relativ reduse, flexibilitatea organizării studiului, ușurința adaptării la diverse condiții de drum și posibilitatea de a obține date detaliate, inclusiv calitative, imposibil de captat cu senzorii standard.

Metoda este limitată de subiectivitatea operatorului, oboseala și gradul de concentrare pe durate extinse, precum și de factori externi (vizibilitate redusă, condiții meteorologice nefavorabile). De asemenea, acuratețea scade la fluxuri foarte dense sau în contexte cu viteze mari.

În practică, observația umană este deseori folosită ca metodă complementară pentru calibrarea echipamentelor automate de detecție, validarea seriilor de date și corectarea erorilor de clasificare a vehiculelor.

Pentru a asigura consistența datelor, se recomandă elaborarea unor protocoale stricte de colectare, inclusiv instruirea personalului, stabilirea clară a perioadelor de observație (ora de vârf, ora de gol/între orele de vârf), alegerea punctelor reprezentative și utilizarea unor fișe standardizate.

Metodele bazate pe observație umană sunt deosebit de valoroase în zonele urbane cu infrastructură neomogenă, unde fluxurile includ vehicule neconvenționale (trotinete, biciclete, căruțe), iar comportamentul rutier poate fi semnificativ diferit de normele standardizate.

Astfel că, datele obținute pot sta la baza calculului capacității intersecțiilor, stabilirii priorităților de semaforizare, amenajării trecerilor de pietoni și dimensionării benzilor de circulație.

Chiar și în era digitalizării infrastructurii și a ITS, observația umană își menține rolul indispensabil în contextul validării datelor automate și al analizelor comportamentale care depășesc nivelul pur cantitativ.

Studiu de caz: Observație umană și calculul volumului de trafic într-o intersecție urbană

Context și obiectiv: Municipiul X intenționează să reconfigureze semaforizarea unei intersecții aglomerate cu patru brațe, unde apar frecvent conflicte de circulație între vehiculele motorizate și pietoni. Obiectivul studiului este determinarea volumului de trafic pe fiecare direcție, estimarea gradului de saturație a intersecției și calculul sarcinii orare maxime.

Date inițiale și ipoteze

Locație: Strada A.

Număr benzi pe sens: 2 benzi/sens.

Durată observație: 1 oră de vârf dimineața (07:00–08:00) și 1 oră de vârf după amiaza (17:00 – 18:00).

Personal: 2 observatori, câte unul pentru fiecare sens de deplasare.

Modul de notare este cel al codului de bare, anume, la fiecare patru linii verticale se va trasa una orizontală care va marca un grup de cinci vehicule, astfel economisind spațiu pe fișa de observare și este un avantaj la numărarea manuală a totalului vehiculelor pe categorii.

Date de identificare și localizare:
 Operator: Jon Mircea
 Locația: Strada Unirii
 Direcția de observare: 1 → 2
 Data și intervalu orar:
12.03.2019, 07:00 – 08:00
 Condiții atmosferice:
 Temperatura 15°C
 Viteza vântului: 4 m/s
 Umiditatea relativă: 43 %
 Luminozitate: 104 lucși

Schită amplasamentului

Interval orar	Categorie de vehicul			
	M1	M2	–	N5
07:00 – 07:15	I	III		I
07:15 – 07:30				
07:30 – 07:45				
07:45 – 08:00				

Data predării: _____ Data prelucrării: _____
 Centralizator nr.: _____

Figura 2.2. Fișă de observare

Datele colectate sunt centralizate pe fișe orare și sunt utilizate ulterior pentru calculul volumelor de trafic, determinarea gradului de saturație al intersecției și pentru a justifica propuneri de optimizare a zonei și a benzilor dedicate transportului public.

Un aspect în proiectarea corectă a unei investigații de trafic bazate pe observație umană este adaptabilitatea fișei de observație la specificul fluxului rutier studiat. Astfel, structura tabelului de colectare a datelor trebuie să reflecte compoziția reală a traficului în zona de studiu.

În practică, categorii de vehicule care se cunosc a fi majoritare (de exemplu: autoturisme, autobuze urbane, vehicule grele de transport mărfuri sau chiar vehicule speciale: taxiuri, biciclete, trotinete) trebuie evidențiate distinct în fișa de observație. Aceasta permite ulterior o prelucrare statistică mai precisă, calculul corect al echivalărilor și determinarea fidelă a gradului de saturație.

Totodată, durata intervalelor de măsurare trebuie calibrate în funcție de scopul studiului și de intensitatea traficului:

- în zone cu fluxuri foarte intense, pot fi utilizate intervale scurte de 1 minut (ex. 60 de intervale pe oră) pentru a surprinde variațiile fine ale debitului și eventualele vârfuri de debit;
- în studii generale cu trafic moderat, intervalele de 5, 10 sau 15 minute sunt cele mai des folosite (ex. 4 intervale de 15 minute/oră);
- pentru investigații de durată, se recomandă combinarea intervalelor scurte cu serii mai lungi pentru a obține atât dinamica detaliată, cât și tendința medie pe perioade extinse.

Astfel că, flexibilitatea metodologică a observației umane este unul dintre principalele avantaje față de metodele complet automate, deoarece permite ajustarea în timp real a planului de observare la condițiile din teren și la nevoile specifice de analiză.

Prin urmare, măsurătorile manuale reprezintă nu doar un suport de bază pentru colectarea de date brute, ci și o etapă de validare și calibrare a metodelor automate și a modelelor teoretice utilizate ulterior în dimensionarea și optimizarea rețelelor rutiere. În acest sens, integrarea atentă a metodelor tradiționale cu tehnologiile moderne de detecție și monitorizare rămâne o direcție prioritară în practica actuală de inginerie a traficului rutier.

2.3. Echipamente și tehnologii pentru monitorizarea automată a fluxului rutier

În contextul actual al urbanizării accelerate și al creșterii continue a mobilității, cerințele privind gestionarea eficientă a traficului rutier impun implementarea unor sisteme de monitorizare moderne, capabile să furnizeze date precise și în timp real. Spre deosebire de metodele clasice bazate pe observație directă și înregistrare manuală, tehnologiile automate de detecție și monitorizare a fluxului rutier răspund nevoii de acuratețe ridicată, continuitate operațională și procesare rapidă a volumelor mari de informații.

Monitorizarea automată a traficului rutier se bazează pe integrarea unor echipamente de detecție inteligente cu soluții avansate de colectare, transmitere și analiză a datelor. Aceste sisteme includ o varietate de tehnologii, fiecare cu un domeniu optim de aplicare și cu caracteristici de performanță specifice: bucle inductive, senzori de presiune, sisteme radar, detectoare cu laser, camere video inteligente, platforme multi-senzor etc.

Rolul principal al acestor echipamente este de a asigura o evaluare continuă și fiabilă a parametrilor de trafic, cum ar fi volumul, viteza instantanee, lungimea vehiculului, tipologia acestuia, timpul de urmărire și gradul de ocupare a benzii de circulație. Prin coroborarea acestor date, autoritățile și specialiștii în trafic pot dimensiona capacitatea infrastructurii, pot detecta în timp util condițiile de congestie și pot implementa măsuri operative de reglare a fluxurilor.

Un alt avantaj fundamental al monitorizării automate constă în capacitatea de a colecta date pe termen lung, în diverse condiții meteorologice și de trafic, cu un nivel ridicat de consistență. Această continuitate este deosebit de importantă pentru modelarea avansată a fluxurilor, pentru validarea modelelor de simulare și pentru fundamentarea deciziilor strategice privind dezvoltarea și modernizarea rețelelor rutiere.

Dezvoltarea recentă a tehnologiilor IoT (*Internet of Things*) și a rețelelor de comunicații de mare viteză (5G) a permis extinderea sistemelor de detecție rutieră către soluții integrate de tip *smart city*.

Internet of Things (IoT) reprezintă un concept tehnologic modern care descrie interconectarea obiectelor fizice cu mediul digital prin intermediul rețelelor de comunicații. Aceste obiecte, denumite în mod uzual „lucruri” (*things*), sunt echipate cu senzori, actuatori, capacitatea de procesare și module de comunicație, care le permit să colecteze date din mediul înconjurător, să le transmită către alte dispozitive sau sisteme informatice și să reacționeze în mod autonom sau semi-autonom, fără a necesita intervenție umană directă.

Un sistem IoT funcțional este alcătuit din mai multe componente esențiale, care acționează integrat. Dispozitivele IoT reprezintă elementul de bază și includ senzori capabili să măsoare diverse mărimi fizice, precum temperatura, presiunea, viteza, poziția sau parametri vizuali și acustici, precum și actuatori care permit acționarea unor elemente fizice, cum ar fi semafoare, bariere sau mecanisme de control. Datele colectate de aceste dispozitive sunt transmise prin intermediul unor rețele de comunicații cablate sau wireless, utilizând tehnologii precum Wi-Fi, rețele celulare 4G/5G sau soluții dedicate, în funcție de cerințele aplicației.

Informațiile provenite din teren sunt prelucrate ulterior de platforme informatice locale sau de tip *cloud*, care asigură stocarea, analiza și corelarea volumelor mari de date generate. Aceste platforme permit implementarea unor algoritmi de analiză avansată și integrarea cu sisteme de inteligență artificială sau *Big Data*, facilitând luarea deciziilor automate sau asistate. Rezultatele procesării sunt puse la dispoziția utilizatorilor prin aplicații software și interfețe grafice, care oferă funcții de monitorizare, control și raportare.

În același timp, evoluția algoritmilor de procesare a imaginilor și recunoaștere automată a obiectelor a crescut semnificativ eficiența detectoarelor video, transformând camerele de supraveghere în veritabile stații de măsurare multifuncționale. Aceste sisteme sunt capabile să clasifice vehiculele, să identifice numerele de înmatriculare, să estimeze viteza și chiar să detecteze abateri de la regimul de circulație, contribuind direct la siguranța rutieră.

Implementarea tehnologiilor automate de detecție trebuie însă corelată cu un cadru tehnic și normativ riguros, care să reglementeze modul de instalare, calibrare, exploatare și mentenanță a echipamentelor. Standardizarea procedurilor de colectare și validare a datelor este vitală pentru a asigura compatibilitatea informațiilor între diferite puncte de monitorizare și pentru a sprijini integrarea datelor la nivel de rețea.

În practică, selecția optimă a tehnologiei de detecție se face pe baza unor criterii bine definite: intensitatea traficului, tipologia vehiculelor, tipul infrastructurii (drum urban, autostradă, pasaj, intersecție), condițiile de mediu, precum și bugetul disponibil. În multe cazuri, se adoptă o combinație de echipamente complementare, pentru a crește precizia și pentru a acoperi limitările fiecărei tehnologii individuale.

Pe lângă beneficiile tehnice, monitorizarea automată oferă și un avantaj strategic pentru planificarea pe termen lung. Datele colectate servesc ca bază pentru studiile de trafic, pentru

elaborarea planurilor de mobilitate urbană sustenabilă și pentru evaluarea impactului noilor investiții în infrastructură. Integrarea cu aplicații de informare a utilizatorilor în timp real contribuie direct la optimizarea comportamentului de deplasare și la reducerea fenomenelor de congestie.

În ansamblu, trecerea de la metodele tradiționale la tehnologii automate de monitorizare a fluxului rutier reflectă direcția actuală a ingineriei. Dezvoltarea și implementarea acestor soluții reprezintă un pilon în tranziția către orașe inteligente și infrastructuri de transport sustenabile, eficiente și sigure.

2.2.1. Detecția vehiculelor prin senzori inductivi și principiul inducției electromagnetice

Utilizarea senzorilor inductivi pentru detecția vehiculelor constituie una dintre cele mai răspândite și consacrate metode de monitorizare automată a fluxurilor rutiere, datorită fiabilității ridicate, robusteții în exploatare și costurilor relativ reduse ale acestui principiu tehnologic. Fundamentul fizic al detecției inductive se bazează pe fenomenul inducției electromagnetice, descris de legile lui Faraday și Lenz, conform cărora orice variație a fluxului magnetic printr-un circuit închis conduce la apariția unei tensiuni electromotoare induse. În cazul aplicațiilor de trafic, prezența unui vehicul metalic în vecinătatea buclei inductive modifică câmpul magnetic local, determinând variații măsurabile ale inductanței circuitului, utilizate pentru identificarea și caracterizarea trecerii vehiculelor.

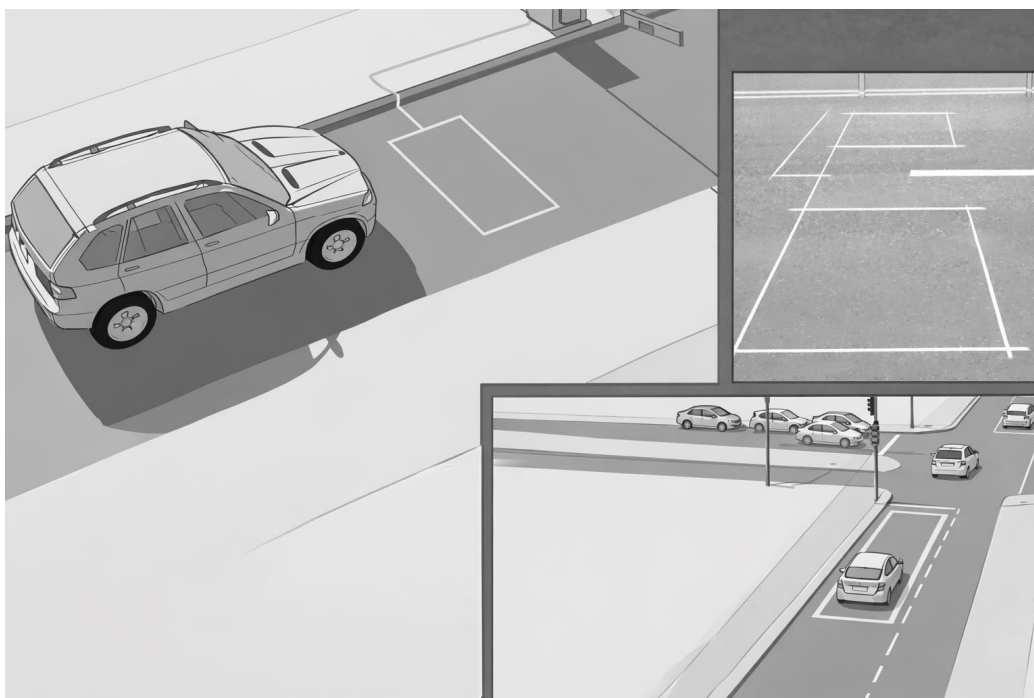


Figura 2.3. Amplasarea buclei inductive

În mod practic, buclele inductive sunt realizate prin înglobarea unor conductori electrici în structura carosabilului, de regulă sub forma unor spire de cablu dispuse într-o configurație rectangulară sau circulară. Aceste bucle sunt conectate la un detector electronic care monitorizează continuu parametrii circuitului, în special inductanța proprie a buclei. Atunci când un vehicul echipat cu masă metalică semnificativă (de regulă, șasiul) trece deasupra buclei, acesta perturbă câmpul electromagnetic generat, determinând o modificare a valorii inductanței.

Sistemul de detecție interpretează această variație ca un semnal de prezență a vehiculului. În funcție de complexitatea echipamentului, senzorii inductivi pot furniza nu doar informația binară (prezență/absență), ci și date suplimentare precum lungimea vehiculului, viteza estimată și direcția de deplasare. Această funcționalitate derivă din arhitectura buclei (numărul de spire, forma, amplasarea) și din algoritmi sofisticati integrați în unitatea de procesare a semnalului.

Avantajele principale ale acestei metode constau în precizia ridicată, adaptabilitatea la diverse condiții meteorologice și costurile reduse de întreținere. Totuși, există și limitări, precum necesitatea intervenției asupra stratului rutier pentru instalare, susceptibilitatea la deteriorări cauzate de lucrări de întreținere a drumului și posibile interferențe electromagnetice generate de surse externe.

Senzorii inductivi sunt utilizați pe scară largă în cadrul intersecțiilor semaforizate pentru activarea semafoarelor inteligente, în parcurile automate pentru numărarea locurilor disponibile, precum și în punctele de colectare a taxelor de drum sau la cântărirea vehiculelor în mișcare (*Weigh-In-Motion*), sistem utilizat pe teritoriul României de către Compania Națională pentru Administrarea Infrastructurii Rutiere (CNAIR). În regim urban, aceste echipamente contribuie substanțial la optimizarea fluxurilor de trafic, permițând ajustarea dinamică a programelor semaforice în funcție de densitatea vehiculelor detectate.

Din perspectiva performanței, parametrii de configurare ai buclelor, cum ar fi adâncimea de montare în carosabil, distanța între spire și caracteristicile materialelor conductoare, influențează direct sensibilitatea și precizia măsurătorilor. De asemenea, calibrarea periodică a sistemului asigură menținerea fiabilității pe termen lung, prevenind erorile de detecție cauzate de uzura infrastructurii.

Așadar, detecția vehiculelor prin senzori inductivi și principiul inducției electromagnetice rămâne o soluție de referință în domeniul ingineriei traficului rutier, datorită caracterului său predictibil, cost-eficient și integrabil cu alte tehnologii de monitorizare și management inteligent al traficului.

Configurația tipică a unui senzor inductiv rutier presupune următoarele componente principale:

- Buclă de inducție: cablu electric izolat, montat într-un șanț frezat în stratul superior al carosabilului, în formă rectangulară (standard 1,5–2 m lungime și 1–1,5 m lățime pentru o bandă de circulație).
- Detector de buclă: unitate electronică de control conectată la buclă, responsabilă de generarea semnalului de frecvență și de măsurarea continuă a parametrilor de inductanță.
- Unitate de procesare a datelor: module integrate (sau servere centrale) unde sunt transmise datele colectate pentru interpretare, stocare și integrare cu sistemele ITS.
- Interfață de comunicare: cablu, modem sau conexiune wireless pentru transmiterea datelor către centrul de management al traficului.

Principiul de funcționare se bazează pe aria suprafeței metalice situate deasupra buclei inductive, ca urmare a efectului pelicular (*skin effect*). Efectul pelicular descrie distribuția neuniformă a densității de curent electric pe secțiunea transversală a unui conductor parcurs de un curent alternativ. Câmpul magnetic variabil generat de acest curent induce curenți turbionari (Foucault), care se manifestă cu sens identic la suprafața conductorului și cu sens opus în interior. Astfel, densitatea curentului electric este maximă la suprafață și minimă în interiorul conductorului.

Cu cât suprafața metalului paralelă cu planul buclei este mai extinsă, cu atât variația frecvenței de rezonanță va fi mai pronunțată. Bucla inductivă este racordată la unitatea de detecție printr-un cablu prelungitor format, de regulă, din două conductoare torsadate, cu o lungime maximă de aproximativ 10 metri. Acest cablu trebuie conectat prin sudură la conductoarele buclei. Majoritatea unităților de detecție transmit semnalul de ieșire printr-un releu care comută starea de contact (închis/deschis). Există două moduri de operare a releului: fie acesta rămâne activ (închis sau deschis) pe întreaga durată în care bucla este ocupată, fie comută doar pentru un interval de timp prestabilit (mod de funcționare impuls).

Cele mai multe detectoare de vehicule permit ajustarea nivelului de sensibilitate. Dacă anumite vehicule nu sunt detectate corespunzător, sensibilitatea este setată prea scăzută. În schimb, o sensibilitate prea ridicată poate conduce la alarme false. Înălțimea maximă la care un vehicul poate fi detectat corespunde, în general, la circa două treimi din lungimea laturii scurte a buclei. Cea mai eficientă modalitate de a spori sensibilitatea constă în creșterea lungimii laturii scurte a buclei. Totuși, o buclă supradimensionată poate genera efecte nedorite: în condițiile

unui trafic lent, de tip coloană, un sistem suprasensibil poate să nu mai discearnă spațiile libere dintre autovehicule, determinând erori de contorizare.

Modificarea numărului de spire influențează stabilitatea buclei, nu sensibilitatea propriu-zisă. Frecvența de rezonanță a buclei variază în timp, ca urmare a modificărilor de mediu, motiv pentru care majoritatea detectoarelor sunt proiectate să compenseze automat aceste variații lente. Funcția lor principală este să identifice modificările rapide ale frecvenței.

Este important de menționat că buclele inductive și modulele de detecție sunt sensibile la schimbările de temperatură. Când temperatura buclei crește, frecvența scade, în timp ce temperatura detectorului are efect invers: odată cu creșterea temperaturii, frecvența acestuia tinde să crească. Dacă variațiile de temperatură ale buclei sau ale detectorului sunt prea bruște, pot apărea semnale false de detecție. În practică, bucla înglobată în infrastructura rutieră își modifică temperatura lent, însă amplasarea incorectă a detectorului poate accentua aceste efecte și poate genera erori de funcționare.

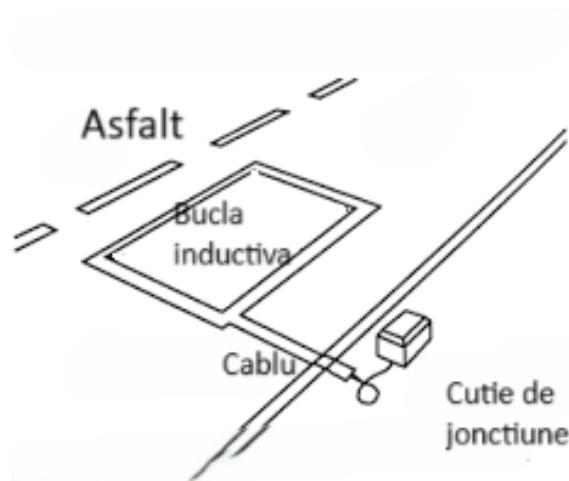


Figura 2.4. Principiul de montare și funcționare a buclei inductive

Principiul fizic se bazează pe legea inducției electromagnetice a lui Faraday și pe relația generală cunoscută dintre inductanța buclei și permeabilitatea mediului.

Fluxul magnetic în buclă este dat de relația:

$$\Phi = B \cdot A \quad (2.1)$$

unde: B – densitatea fluxului [Weber/m²]

A – aria buclei [m²]

Inductanța buclei, L, se calculează astfel:

$$L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot F'}{l} \quad (2.2)$$

unde: μ_r – permeabilitatea relativă a materialului – în cazul aerului este egală cu 1

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Henry/m]

N – numărul de spire

A – aria secțiunii buclei [m²]

l – lungimea buclei [m]

F' – factor de corecție datorat neuniformității fluxului magnetic prin buclă

Când un vehicul metalic se deplasează peste buclă, acesta acționează ca un scurtcircuit parțial pentru liniile de flux magnetic, modificând permeabilitatea locală și implicit inductanța, determinând un salt detectabil, denumit efect feromagnetic, care crește inducția.

Evaluarea eficienței buclei inductive se poate face aplicând relația:

$$Q_f = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s}{R_s} \quad (2.3)$$

unde: f – frecvența sistemului [Hz]

L_s – inductanța buclei [Henry]

R_s – rezistența circuitului serie [Ohm]

Frecvența de rezonanță a buclei inductive este:

$$f_r = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{L_s \cdot C_p \left(1 + \frac{1}{Q_r}\right)}} \quad (2.4)$$

unde: C_p – capacitatea buclei inductive

Q_r – factorul de calitate la rezonanță

În cazul rezonanței, factorul de pierderi indus de bucla inductivă este următorul:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{1}{(R_s)^2} \cdot \frac{L_s}{C_p} - 1} \quad (2.5)$$

Un alt factor generator de pierderi calitative îl reprezintă capacitatea electrică a buclei inductive, care, asociată cu rezistența circuitului electronic conectat în paralel, conduce la apariția unor penalizări de evaluare a semnalului, cuantificate conform relației:

$$Q_p = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot C_p \cdot R_p \quad (2.6)$$

Factorul global de calitate se determină astfel:

$$Q_g = \left(\frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_p}\right)^{-1} = \frac{Q_0 \cdot Q_p}{Q_0 + Q_p} \quad (2.7)$$

Pierderile generate de curenții de înaltă frecvență care se manifestă în bucla inductivă determină variația factorului de calitate al echipamentului, acesta fiind dependent de condițiile concrete de amplasare și instalare. În consecință, calibrarea inițială efectuată la momentul

montării devine indispensabilă și trebuie completată prin recalibrări periodice, impuse de cerințele specifice ale programului de mentenanță aplicat sistemului de detecție.

Exemplu în zona urbană

Într-o intersecție cu patru ramuri, fiecare bandă de stocare la semafor este echipată cu una sau două bucle inductive, montate la o distanță de 2–5 m înaintea liniei de oprire.

Configurația standard implică:

- buclă de prezență, aproape de linia de STOP, care detectează vehiculul staționat,
- buclă de detecție a deplasării, montată mai în amonte, pentru estimarea vitezei și lungimii vehiculului.

Exemplu în zona extraurbană (autostradă)

La punctele de taxare, buclele sunt dispuse în serie pentru a număra vehiculele, a determina categoria de vehicul (prin lungime) și a activa barierele automate.

Cerințe tehnice și recomandări de instalare:

- Calitatea cablului: se utilizează conductor cu izolație rezistentă la uzură, temperaturi extreme și apă, frecvent cablu din cupru cu izolație PVC sau polietilenă.
- Adâncimea de montare standard: 4–10 cm sub suprafața stratului de uzură.
- Lățimea șanțului este de regulă 3–5 mm, umplut ulterior cu rășină bituminoasă sau mastic elastic.
- Protecție mecanică: este important ca traseul cablului să fie protejat de fisuri, tasări sau foraje ulterioare.
- Compatibilitate EMC (*Electromagnetic Compatibility*) pentru a reduce erorile de detecție, cablul de legătură dintre buclă și detector trebuie ecranat și dispus cât mai departe de surse de interferență (cablu de alimentare de înaltă tensiune).
- Calibrare periodică: verificarea anuală a funcționalității, ajustarea parametrilor de sensibilitate și remedierea eventualelor deteriorări ale buclelor.

Integrarea buclelor inductive cu sisteme avansate de procesare a datelor și rețele de comunicație contribuie la fundamentarea deciziilor de management al traficului în timp real. Precizia, fiabilitatea și costurile controlabile fac din detecția inductivă o tehnologie de bază, adaptabilă cerințelor moderne ale orașelor inteligente și infrastructurii de transport de mare capacitate.

2.2.2. Detecția traficului prin plăci și celule de presiune de contact integrate în infrastructură

Detecția traficului prin plăci și celule de presiune de contact integrate în infrastructură reprezintă una dintre metodele clasice, dar extrem de eficiente, de monitorizare automată a fluxurilor rutiere, utilizată în special pentru numărarea vehiculelor, evaluarea masei acestora și determinarea parametrilor de sarcină axială. Această tehnologie are la bază principiul transformării forței mecanice exercitate de roțile vehiculului asupra suprafeței carosabile în semnale electrice măsurabile și procesabile.

Sistemele de detecție cu plăci de presiune sunt alcătuite dintr-un ansamblu de senzori piezoelectrice sau celule de sarcină (*load cells*) integrate în structura drumului, de regulă la nivelul stratului de rulare sau imediat sub acesta. Plăcile de contact sunt poziționate strategic, transversal pe banda de circulație, astfel încât orice vehicul care le traversează să exercite o presiune directă și să activeze senzorii. La trecerea roților, presiunea generată induce o deformare mecanică a elementului sensibil, care generează o sarcină electrică proporțională cu intensitatea forței aplicate.

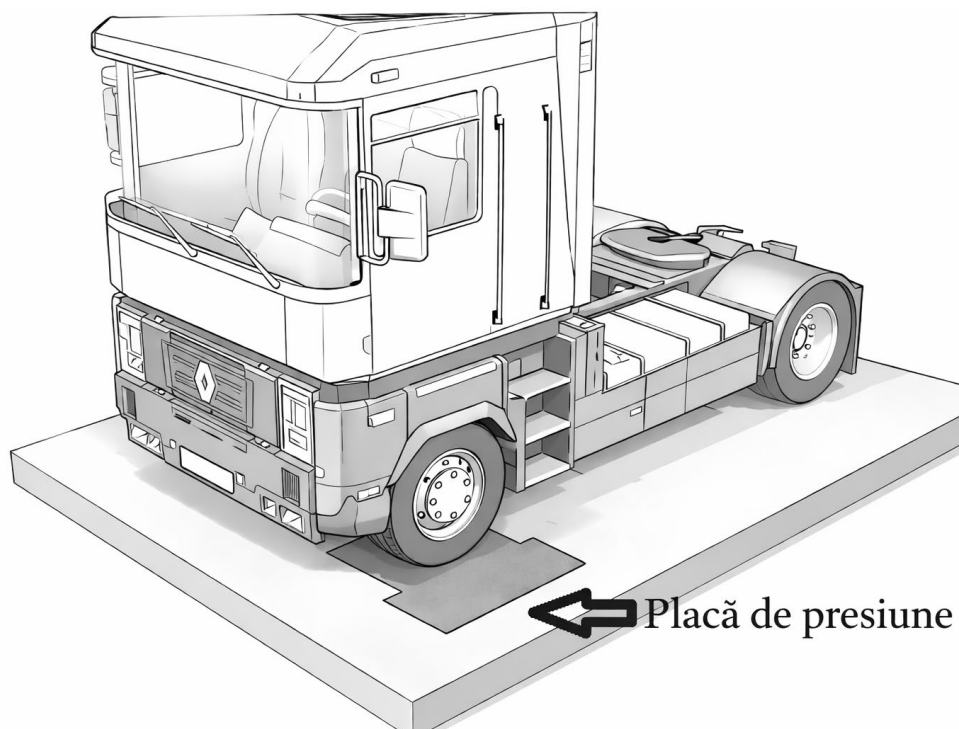


Figura 2.5. Sistemul de detecție cu placă de presiune

Principalele avantaje ale acestei tehnologii derivă din precizia ridicată în măsurarea sarcinii pe osie, posibilitatea de clasificare a vehiculelor pe baza distribuției maselor și vitezei, precum și capacitatea de integrare cu alte sisteme automate de control al traficului, cum ar fi

părțile de cântărire în mișcare (*Weigh-In-Motion - WIM*). Astfel, celulele de presiune de contact constituie o bază în strategiile moderne de management al traficului și de protecție a infrastructurii rutiere împotriva suprasarcinilor.

Din punct de vedere tehnic, parametrii fundamentali care definesc performanța unui astfel de sistem sunt sensibilitatea senzorilor, domeniul de măsurare, acuratețea semnalului, viteza de răspuns și durabilitatea mecanică. În mod obișnuit, sistemele sunt concepute să reziste la solicitări repetate și la condiții de mediu variate (umiditate, temperaturi extreme, praf, vibrații).

Semnalul analogic generat de celulele de presiune este transmis către o unitate de prelucrare, unde este convertit în date digitale, stocat și transmis către centrele de control al traficului.

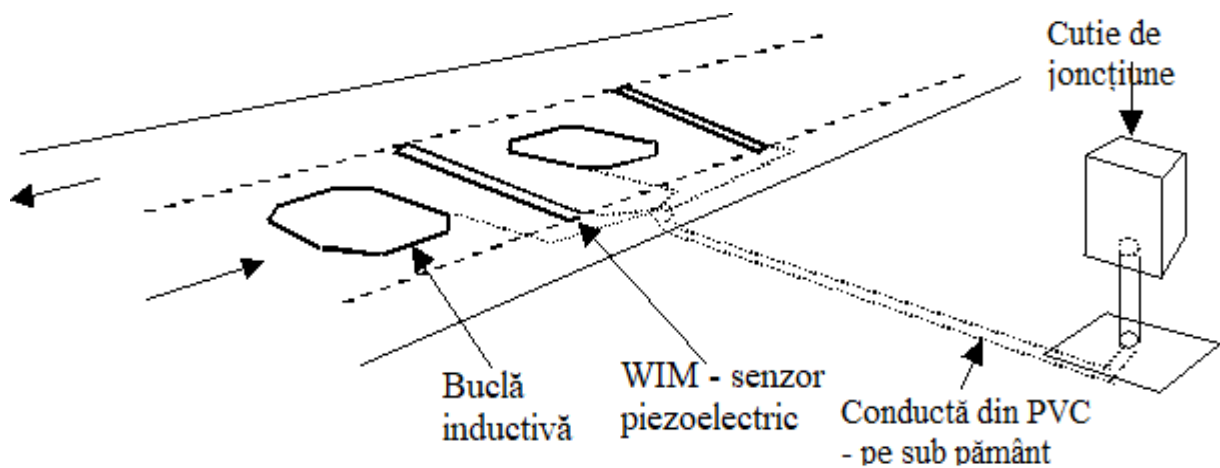


Figura 2.6. Integrarea senzorilor piezoelectrice cu buclele inductive

Integrarea plăcilor de presiune cu sisteme informatice de colectare și analiză permite nu doar contorizarea vehiculelor, ci și identificarea tipurilor de vehicule (autoturisme, camioane ușoare, camioane grele) pe baza tiparelor de sarcină și a numărului de osii. Această capacitate este utilă în dimensionarea corectă a capacității de transport a drumurilor și în planificarea lucrărilor de întreținere.

Un exemplu aplicativ concret îl reprezintă instalarea de stații WIM pe drumurile naționale și autostrăzi, unde celulele de presiune de contact permit monitorizarea continuă a masei vehiculelor comerciale în deplasare, fără a fi necesară oprirea acestora.

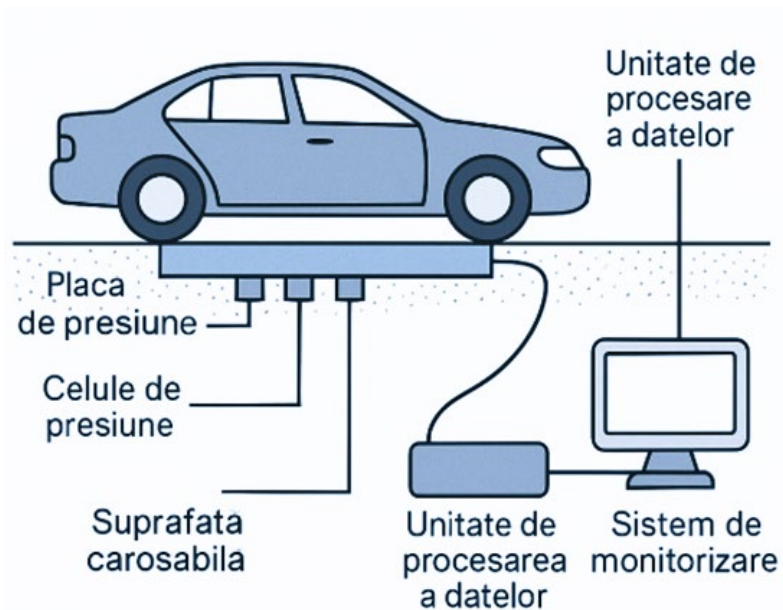


Figura 2.7. Sistemul cu celule și placă de presiune

Astfel de date sunt utilizate pentru prevenirea suprasolicitării drumurilor, stabilirea taxelor de drum în funcție de greutatea reală transportată și fundamentarea politicilor de întreținere predictivă a infrastructurii.

2.2.3. Detecția optică a vehiculelor utilizând tehnologii infraroșu și fotodiodă

Detecția optică a vehiculelor utilizând tehnologii cu infraroșu și fotodiodă constituie o metodă modernă și versatilă de monitorizare automată a fluxurilor de trafic, cu aplicabilitate extinsă în contexte unde precizia și viteza de reacție a sistemului de detecție sunt deosebit de importante. Această tehnologie se bazează pe principiul propagării radiației electromagnetice în domeniul infraroșu (IR) și pe capacitatea fotodiodelor de a converti energia radiantă recepționată în semnal electric măsurabil.

Într-o configurație standard, sistemul este alcătuit dintr-o sursă de radiație infraroșie, de obicei un emițător LED IR, și un receptor optic (fotodiodă sau fototranzistor) dispus în linie cu fasciculul emis. Dispunerea poate fi realizată în regim de barieră optică (emisie directă) sau în regim reflectiv, caz în care fasciculul este reflectat de caroseria vehiculului și apoi captat de senzor. Trecerea vehiculului prin zona de detecție produce întreruperea fasciculului sau modifică intensitatea radiației reflectate, generând o variație a semnalului electric de ieșire.

Semnalul electric generat de receptorul optic este transmis către o unitate de procesare a semnalului, care îndeplinește un rol esențial în conversia, filtrarea și interpretarea datelor primare. Această unitate este compusă, de regulă, dintr-un modul de amplificare, un circuit de

filtrare a zgomotului de fond și un microcontroler sau procesor de semnal digital (DSP) care efectuează analiza și extragerea parametrilor de interes.

În etapa inițială, semnalul analogic de la fotodiodă este amplificat pentru a crește raportul semnal-zgomot, asigurând astfel o detecție robustă chiar și în condiții de iluminare ambientală variabilă. Filtrarea activă și pasivă contribuie la eliminarea interferențelor de frecvență nedorită, inclusiv a reflexiilor parazite cauzate de obiecte străine sau fenomene atmosferice.

Conversia analog-digitală (ADC) transformă semnalul amplificat într-o formă digitală, permițând procesorului să aplice algoritmi de analiză avansați. Printre aceștia se numără detecția pragurilor de întrerupere, calculul duratei de întrerupere a fasciculului (timp de trecere), determinarea vitezei vehiculului pe baza diferenței de timp între fascicule multiple și estimarea lungimii vehiculului.

De asemenea, unitatea de procesare poate integra funcționalități de autocalibrare și diagnostic, adaptând sensibilitatea senzorului în funcție de condițiile de mediu (ploaie, ceață, praf) și semnalând eventuale defecțiuni sau abateri de la parametrii optimi de funcționare.

Datele procesate sunt ulterior transmise către un sistem central de colectare și stocare a datelor, unde pot fi agregate, analizate statistic și corelate cu informații provenite de la alte echipamente din rețeaua de monitorizare a traficului. În aplicațiile avansate, unitatea de procesare poate comunica prin protocoale de rețea standardizate (Ethernet, RS-485, CAN) cu platformele ITS, integrându-se ușor în infrastructura inteligentă a orașelor.

Prin performanța ridicată a modulelor de procesare, detecția optică cu infraroșu și fotodiodă reușește să ofere o acuratețe sporită și o versatilitate ridicată, fiind adaptabilă atât traficului rutier urban, cât și celui periurban sau de pe coridoarele de mare viteză.

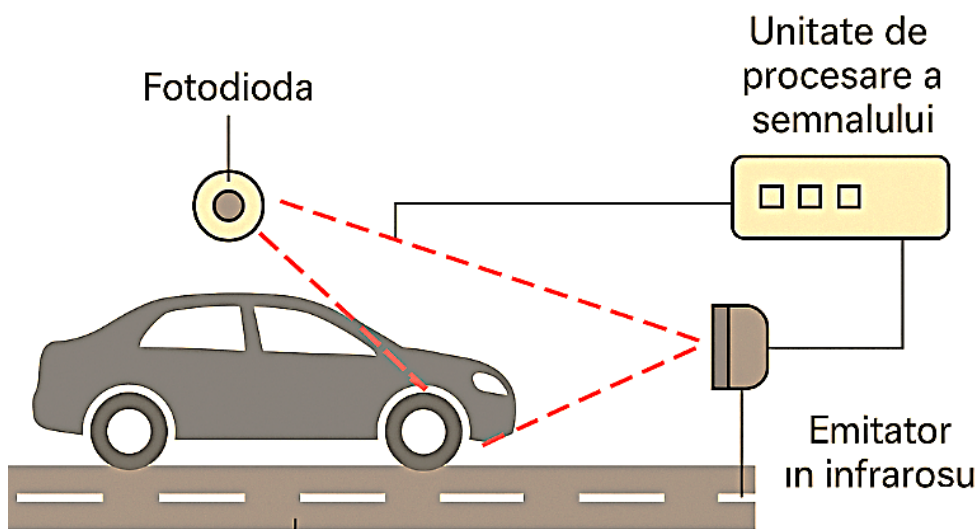


Figura 2.8. Detecția optică cu infraroșu și fotodiodă

Avantajul major al tehnologiei optice cu infraroșu și fotodiodă constă în capacitatea de a asigura detecția punctuală, cu rezoluție temporală ridicată, fiind capabilă să determine parametri precum momentul exact al trecerii axei roților, viteza instantanee, lungimea vehiculului sau distanța între vehicule. Instalarea senzorilor cu infraroșu nu necesită lucrări invazive asupra carosabilului, reducând astfel costurile și timpul de implementare, dar și impactul asupra fluxului rutier în timpul instalării. Un avantaj suplimentar al senzorilor activi cu infraroșu este că pot transmite mai multe fascicule, ceea ce permite măsurarea precisă a caracteristicilor vehiculului. De asemenea, modelele montate lateral permit detectarea prezenței pe mai multe benzi de circulație, ceea ce le conferă flexibilitate în zone cu infrastructură complexă.

În plus, senzorii optici cu infraroșu pot funcționa și în medii cu lumină ambientală variabilă, iar datorită tehnologiei cu bandă îngustă, sunt mai puțin susceptibili la interferențe electromagnetice provenite de la alte echipamente rutiere. Majoritatea sistemelor moderne beneficiază de funcții avansate de auto-calibrare și ajustare automată a sensibilității, optimizând astfel precizia măsurătorilor în condiții dinamice de exploatare.

Un alt avantaj notabil este întreținerea redusă, întrucât aceste sisteme nu presupun contact direct cu fluxul de vehicule, fiind montate de regulă pe structuri adiacente drumului sau pe portaluri de supraveghere. Tehnologiile moderne de procesare a semnalului permit integrarea senzorilor cu sisteme de recunoaștere automată a numerelor de înmatriculare și cu platforme ITS, extinzând astfel aria de aplicabilitate către zone precum managementul inteligent al intersecțiilor și monitorizarea traficului în timp real.

De asemenea, detecția optică cu infraroșu și fotodiodă poate fi integrată cu sisteme de avertizare timpurie și semnalizare dinamică, sprijinind gestionarea eficientă a fluxurilor de vehicule și creșterea gradului de siguranță rutieră. Adaptabilitatea la scenarii diverse de infrastructură și posibilitatea de scalare rapidă fac din această tehnologie o opțiune sustenabilă și eficientă pentru autoritățile responsabile cu monitorizarea și controlul traficului rutier.

Din punct de vedere tehnic, performanța sistemului depinde de factori precum lungimea de undă a radiației IR utilizate, sensibilitatea fotodiodei, raza de acțiune, viteza de răspuns și imunitatea la interferențele optice externe (lumină solară directă, faruri, reflexii parazite). Pentru creșterea fiabilității, emițătorul IR funcționează, de regulă, în regim modulabil, cu semnal pulsatoriu la frecvențe bine definite, ceea ce permite filtrarea semnalului util de zgomotul optic de fond.

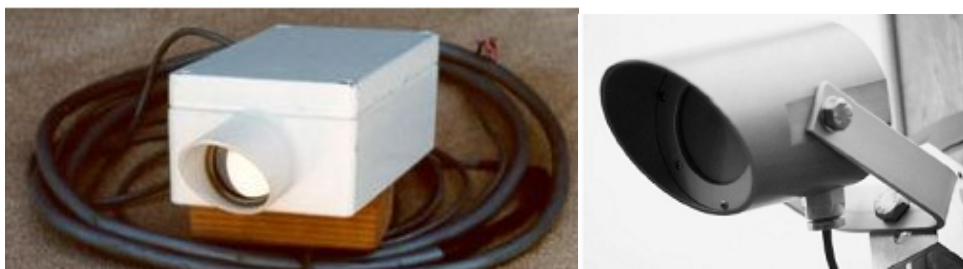


Figura 2.9. Modele de camere cu infraroșu

În mediul urban, unde traficul este caracterizat de volume ridicate și o diversitate mare a vehiculelor, detecția optică IR poate fi combinată cu alte tehnologii (radar, buclă inductivă, video) în soluții hibride, sporind robustețea și precizia generală a sistemului de monitorizare. Astfel, datele colectate pot fi corelate pentru a furniza informații precise despre parametrii fluxului rutier: viteza medie, densitatea vehiculelor, intervalele de timp între vehicule sau gradul de ocupare a benzilor.

În funcționare acestui sistem se pot regăsi și câteva dezavantaje. Reflexia luminii solare poate genera semnale nedorite și confuze. Particulele atmosferice și condițiile meteorologice nefavorabile pot dispersa sau absorbi energia care altfel ar ajunge la planul focal. Efectele de dispersie și absorbție sunt influențate de concentrațiile de apă din ceață, păclă, ploaie și ninsoare, precum și de alți factori de obturare, cum ar fi fumul și praful. Totuși, la distanțele relativ scurte de operare întâlnite în aplicațiile de management al traficului, aceste probleme pot să nu fie semnificative. Cu toate acestea, se pot regăsi și unele degradări ale performanței în condiții de ploaie, polei și ninsoare. O regulă pentru a evalua când un senzor cu infraroșu poate întâmpina dificultăți în detectarea unui vehicul pe timp de vreme nefavorabilă este să se observe dacă un om poate vedea vehiculul în aceleași condiții. Dacă observatorul uman poate vedea vehiculul, există o probabilitate mare ca și senzorul cu infraroșu să îl detecteze.

Un exemplu concret de aplicare îl constituie sistemele de control a fluxului la intrarea și ieșirea din parcuri comerciale, unde barierele IR cu fotodiodă sunt montate la nivelul carosabilului, iar semnalul generat la fiecare întrerupere a fasciculului este transmis în timp real către un controller central. Pe baza acestor date, se calculează gradul de ocupare și se optimizează fluxul de intrare/ieșire, reducând timpul de așteptare și creșterea eficienței operaționale.

Un alt domeniu de utilizare este cel al sistemelor automate de control al accesului pe benzi dedicate (ex. benzi de transport public), unde barierele IR monitorizează strict trecerea vehiculelor autorizate și declanșează alarme în cazul detectării neautorizate.

Astfel că, detecția optică cu tehnologie infraroșu și fotodiodă rămâne un instrument versatil și fiabil, cu aplicabilitate extinsă în managementul modern al traficului, contribuind semnificativ la colectarea datelor de înaltă calitate și la luarea deciziilor de optimizare a infrastructurii și a fluxurilor rutiere.

2.2.4. Detecția radar pentru monitorizarea fluxului rutier

Detecția radar reprezintă o tehnologie moderne utilizate în monitorizarea fluxurilor rutiere, datorită capacității sale de a funcționa eficient în diverse condiții meteorologice și de

iluminare. Principiul de funcționare al senzorilor radar se bazează pe emisia de unde electromagnetice de frecvență radio și pe analiza semnalelor reflectate de suprafața vehiculului în mișcare.

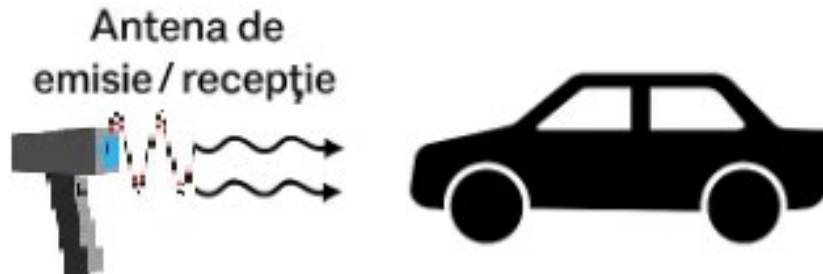


Figura 2.10. Principiul de funcționare al radarului Doppler

Într-un sistem tipic, antena radar emite un fascicul de unde electromagnetice într-un sector direcțional bine definit. La întâlnirea cu un obiect, în acest caz, un vehicul, o parte din energia emisă este reflectată înapoi către antenă, unde este recepționată și convertită într-un semnal electric. Acest semnal reflectat poartă informații despre distanța până la țintă (vehicul), viteza relativă și direcția de deplasare, acestea fiind extrase prin analiza efectului Doppler și a întârzierii de fază.

Sistemele radar utilizate în traficul rutier se clasifică, în funcție de tehnologia de procesare, în radare cu undă continuă (CW), radare cu undă continuă modulată în frecvență (FMCW) și radare cu impulsuri. Radarele FMCW sunt cele mai frecvent utilizate pentru aplicații de monitorizare a fluxului rutier, întrucât oferă o rezoluție bună pentru determinarea simultană a distanței și vitezei vehiculului.

Avantajul major al detecției radar constă în independența față de condițiile de vizibilitate. Spre deosebire de senzorii optici, radarele nu sunt afectate semnificativ de ploaie, ceață densă, ninsoare sau praf. De asemenea, acestea pot funcționa fără limitări în condiții de lumină scăzută sau pe timp de noapte, fiind astfel o soluție fiabilă pentru monitorizarea 24/7 a traficului.

Unitatea de procesare asociată sistemului radar efectuează prelucrarea semnalului reflectat prin algoritmi specializați de filtrare Doppler, separând vehiculele aflate în mișcare de eventualele obiecte staționare. Astfel, este posibilă determinarea vitezei instantanee, a direcției de deplasare și chiar a clasei de vehicul, atunci când se utilizează radare multi-beam cu rezoluție angulară ridicată.

Radarul Doppler funcționează pe baza efectului omonim: când o undă electromagnetică este emisă spre un obiect în mișcare, frecvența semnalului reflectat diferă de frecvența semnalului emis. Această variație de frecvență (decalaj Doppler) este direct proporțională cu componenta vitezei obiectului pe direcția liniei vizuale (radială).

Formula cunoscută a efectului Doppler pentru radar este:

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cdot \cos\theta \quad (2.8)$$

unde: f_D – frecvența Doppler [Hz]

v – viteza țintei [m/s]

λ – lungimea de undă a semnalului radar [m]

θ – unghiul dintre direcția de deplasare a țintei și direcția fasciculului radar

Aplicațiile radar în domeniul traficului rutier includ:

- Monitorizarea vitezei vehiculelor pe segmente rutiere critice (radare de tip *spot-speed*);
- Detectia prezenței și numărarea vehiculelor pe mai multe benzi simultan;
- Integrarea în sisteme automate de sancționare a depășirii vitezei legale;
- Suport pentru sisteme de management adaptiv al traficului (control semaforic dinamic);
- Implementarea de sisteme de avertizare a coliziunilor și de monitorizare a traficului în intersecții complexe.

Montajul echipamentelor radar poate fi realizat fie la marginea drumului (*side-fired radar*), fie deasupra carosabilului (*overhead-mounted radar*), în funcție de geometria zonei de monitorizare și de numărul benzilor de circulație. Modelele moderne sunt compacte, ușor de integrat și pot comunica wireless cu unități de procesare la distanță, utilizând protocoale standardizate pentru date de trafic.

Tehnologia radar rămâne o componentă esențială a infrastructurii inteligente de transport, contribuind decisiv la colectarea datelor de trafic de înaltă fidelitate și la optimizarea managementului rețelelor rutiere moderne. Performanța sa robustă și costurile de exploatare reduse justifică integrarea sa în schemele avansate de monitorizare a traficului urban și interurban.

Configurații radar utilizate în monitorizarea traficului rutier

În practică, implementarea sistemelor radar se realizează prin diverse configurații adaptate topologiei drumului, cerințelor de monitorizare și limitărilor de mediu:

Radar lateral

Este amplasat pe marginea drumului, având un unghi oblic față de axa de deplasare. Această poziționare permite măsurarea vitezei prin efectul Doppler și estimarea distanței de trecere a vehiculului. Această configurație este frecvent utilizată pentru radarele fixe de control al vitezei și pentru detectarea fluxului pe drumuri cu una sau mai multe benzi.

Radar suspendat deasupra carosabilului

Instalat pe portaluri, grinzi transversale sau stâlpi de iluminat. Este recomandat în special pentru detectarea traficului pe mai multe benzi simultan, cu precizie crescută în determinarea poziției laterale a vehiculului, lățimii acestuia și direcției de deplasare.

Radar integrat în infrastructuri mobile

Unele echipamente radar sunt montate pe vehicule mobile de monitorizare sau pe drone, pentru inspecția rapidă a condițiilor de trafic pe tronsoane extinse.

Schema de principiu a unui sistem radar de monitorizare

Un radar rutier standard este compus din:

- Antena de emisie/recepție: Direcționează fasciculul și colectează undele reflectate;
- Generatorul de semnal RF: Produce undele electromagnetice la frecvențele de operare (tipic între 24 GHz și 77 GHz pentru aplicații de trafic);
- Mixerul și blocul de demodulare: Extrage componenta Doppler și întârzierile de fază din semnalul recepționat;
- Procesorul de semnal digital (DSP): Analizează informațiile, identifică țintele valide și calculează parametrii cinetici ai vehiculului;
- Unitatea de comunicare: Transmite datele către infrastructura de management al traficului.

Avantaje ale detecției radar:

- Robustețe ridicată în orice condiții de iluminare și vreme: Performanța nu este sensibilă la întuneric, ploaie ușoară, ceață moderată sau condiții de iluminare variabilă.
- Măsurare simultană a vitezei și distanței: Prin efectul Doppler și analiză de fază, radarul poate determina viteza relativă și poziția exactă a vehiculului.
- Capacitate multi-benzi: Modelele cu rezoluție angulară ridicată pot urmări fluxul pe mai multe benzi simultan, inclusiv direcția de deplasare.
- Instalare non-invazivă: Nu necesită lucrări asupra structurii drumului, instalarea se face pe infrastructura existentă (stâlpi, portaluri).

- Durată lungă de viață și mentenanță redusă: Fiind sisteme fără componente în contact direct cu traficul, riscul de deteriorare mecanică este minim.

Limitări

- Reflexii multiple și obiecte fixe: În zone urbane dense, clădirile sau alte vehicule pot genera reflexii multiple, necesitând algoritmi avansați de filtrare.
- Erori la viteze foarte mici: Determinarea vitezei vehiculelor care se deplasează lent sau stau pe loc poate fi afectată de zgomotul de fond.
- Interferențe electromagnetice: Prezența altor echipamente RF în apropiere poate influența precizia detecției dacă nu există măsuri de protecție electromagnetică (EMC).
- Limitări de rezoluție laterală: Deși radarele moderne dispun de fascicule multiple, în unele situații benzi foarte apropiate pot necesita ajustări de poziționare sau multiple unități radar.

Exemplu de radar Doppler - fix

Radarul Doppler de tip SDR Data Collect (*Software Defined Radio* – colector de date de trafic) este un echipament destinat măsurării vitezei și/sau detecției prezenței obiectelor în mișcare, utilizând efectul Doppler. Față de radarele convenționale, tehnologia SDR (*Software Defined Radio*) permite procesarea semnalului și adaptarea parametrilor radarului (frecvență, lățime de bandă, filtre, algoritmi) prin intermediul software-ului, asigurând flexibilitate sporită și capabilități avansate de colectare și analiză a datelor brute.¹⁴

Sistemul SDR *Radar Traffic Classifier* oferă o soluție de măsurare a vitezei și volumului de trafic, combinând flexibilitatea și procesarea software a unui SDR, cu interfață wireless (Bluetooth/GPRS) și instrumente avansate de analiză și raportare. Variantele single sau dual-lane și opțiunea de cloud direct (*myTrafficData*) îl recomandă pentru proiecte urbane, de monitorizare infrastructurală și analize de mobilitate inteligente.

Date tehnice principale

- Tip senzor: microunde, bandă ISM la 24,125 GHz, putere de emisie 5 mW
- Domeniu măsurare viteze: între 3–199 km/h (sau 2–130 mph), cu rezoluție de 1 km/h, respectiv 0,1 m
- Rază de acoperire ajustabilă: până la 120 m pentru autovehicule standard
- Temperatură operare: între –25 °C...+75 °C

¹⁴ DataCollect Traffic Systems GmbH, „SDR Radar Traffic Classifier.” Disponibil la <https://www.datacollect.com/en/mobility-data-analysis/measuring-systems/sdr-radar-traffic-classifier/>. Accesat la data de 21.10.2025.



Figura 2.11. Radarul SDR Data Collect

Hardware și dimensiuni

- Alimentare / consum: baterie reîncărcabilă, 12 V, consum tipic ~80 mA
- Masă: unitate SDR: ~4,7 kg
- Acumulator: 2,7 kg (opțional 6,3 kg)
- Carcasă: material PVC, IP67, dimensiuni aproximative 300 × 350 × 150 mm

Instalare și calibrare

- Montaj: Poate fi instalat pe stâlp, pod sau stativ lateral, la o înălțime maximă de 12 m, cu distanță de până la 12 m față de centrul benzii
 - Unghi orizontal optim: 45° la direcția traficului (există accesoriu Laser45)
 - Unghi vertical: între 30°–90°, calculat automat în funcție de înălțime
- Calibrare: Disponibil modul AutoCal („self-calibrating”), dar se poate realiza și manual, cu PDA sau dispozitiv mobil cu aplicația instalată



Figura 2.12. Montaj radar

Procesare date și comunicație

- Memorie internă: 512 kB...16 MB (în funcție de versiune)
- Date per vehicul: se înregistrează viteză, dată și oră, direcția și lungimea vehiculului
- Rată transmisie date: până la 115200 baud
- Comunicare locală: Bluetooth pentru monitorizare și configurare (raza ~100 m LOS)
- Comunicare globală: GPRS/4G (opțional UCM-board), control și transfer de date prin web

Configurare și monitorizare

- Configurare locală: prin aplicație PDA (ex. Palm PDA) cu interfață DataCollectCom, sau prin aplicație disponibilă pentru a fi instalată pe dispozitive mobile de tip telefon sau tabletă
- Funcționalitate online: vizualizare în timp real a fiecărui vehicul (viteză, lungime, direcție)

Standarde de stocare

Minim 5 ore de înregistrare continuă pentru generare raport (interval min. 15 min)

Analiză și export

- Software de evaluare: DC-Report (macro Excel), dar sunt disponibile și formate ASCII, SEQ, DMP, SCP
- Analiză: volume pe clase de vehicule, distribuții de viteză (percentile V15, V85, medie), grafice și tabelare

Aplicații și variante

- Modul *Single-Lane*: măsurare flux pe o singură bandă (bidirecțional)
- Variația *Dual-Lane*: capacitate de măsurare simultană pe două benzi în aceeași direcție
- Integritate *cloud*: transmite date către platforma *myTrafficData* pentru analiză centralizată și actualizări de firmware

Exemplu de radar Doppler – mobil

Radarele de tip pistol, denumite astfel datorită ergonomiei și formatului portabil, reprezintă o categorie distinctă în rândul echipamentelor radar mobile, fiind proiectate special pentru utilizarea de către agenții de poliție rutieră sau alte autorități de control al traficului. Aceste dispozitive se remarcă prin manevrabilitate, simplitate operațională și capacitatea de a efectua măsurători precise în regim staționar sau din mișcare, inclusiv de pe motocicletele sau autovehiculele de patrulare.

Un exemplu relevant de radar portabil modern este Falcon HR, produs de compania Kustom Signals, unul dintre liderii mondiali în dezvoltarea tehnologiilor de supraveghere radar.¹⁵ Falcon HR funcționează în banda K, utilizează procesare digitală de semnal (DSP) pentru filtrarea țintelor multiple și direcționarea fasciculului radar, și dispune de afișaj digital retroiluminat pentru vizibilitate optimă în condiții diverse de iluminare. Aparatul poate opera atât în regim staționar, cât și în regim dinamic (în mișcare), detectând vitezele vehiculelor care se apropie sau se îndepărtează de operator.

De asemenea, radarele portabile actuale integrează funcționalități avansate precum detecția țintei cu viteza maximă (mode *Fastest Vehicle*) și opțiuni de validare a direcției de deplasare, minimizând riscul de erori cauzate de semnalele parazite sau de reflexiile nedorite. Autonomia energetică extinsă, furnizată de baterii reîncărcabile, permite agenților să efectueze măsurători pe teren pentru intervale de timp îndelungate, fără a necesita infrastructură suplimentară de alimentare.

¹⁵ Kustom Signals, „Falcon HR Handheld Radar.” Disponibil la <https://kustomsignals.com/handheld-radar/falcon-hr>. Accesat la data de 21.10.2025.



Figura 2.13. Radar mobil

Specificații tehnice:

- Bandă de operare: K-band, 24,125 GHz \pm 100 MHz
- Moduri de funcționare:
 - *Staționar (parcat)*: precizie \pm 1 mph (\pm 1 km/h)
 - *În mișcare (patrulează)*: +1/-2 mph (+1/-2 km/h)
- Gamă de viteză:
 - Staționar: 16–330 km/h (typ. 9–334 km/h)
 - În mișcare: 16–160 km/h (typ. 9–193 km/h)
- Afișaj: LCD static, iluminare prin fibră optică
- Procesare DSP: identifică rapid cele mai rapide ținte, suport direcțional
- Alimentare: baterie reîncărcabilă, autonomie > 30 h
- Montaj opțional: ținut în mână sau prindere pe bord sau motocicletă, cu accesorii dedicate

2.2.5. Detecția vehiculelor prin tehnologii laser

Detecția vehiculelor prin tehnologii laser este una dintre cele mai avansate și precise metode de monitorizare automată a fluxului rutier, fiind utilizată pe scară largă în sisteme

moderne de măsurare a vitezei, clasificare a vehiculelor, control al încălcărilor de trafic și colectare de date statistice. Principiul fundamental al tehnologiei laser se bazează pe emisia unui fascicul coerent de lumină, generat de o diodă laser sau un emițător cu semiconductor, care este proiectat către vehiculul aflat în mișcare. Reflectarea fasciculului de către suprafața vehiculului permite măsurarea cu o precizie ridicată a distanței și a vitezei, utilizând efectul Doppler și principiul timpului de zbor (*time-of-flight*).

Un sistem tipic de detecție laser este alcătuit dintr-o unitate de emisie-recepție, un sistem optic de focalizare și colimare, un modul de prelucrare a semnalului și o unitate de comunicație cu infrastructura de control a traficului. Măsurarea vitezei se face prin compararea modificării frecvenței fasciculului reflectat față de cel emis (efect Doppler) sau prin calculul direct al timpului necesar propagării semnalului dus-întors. Această tehnologie permite nu doar detecția prezenței vehiculului, ci și determinarea unor parametri suplimentari, precum lungimea vehiculului, înălțimea, forma conturului și chiar numărul de axe, prin scanări liniare sau 3D.

Avantajele detecției laser includ precizia ridicată, insensibilitatea la interferențele electromagnetice, capacitatea de a funcționa pe mai multe benzi simultan și adaptabilitatea la diverse configurații de drumuri, de la autostrăzi la intersecții urbane complexe. De asemenea, tehnologia permite măsurători la distanță mare, cu unghiuri variabile, fiind eficientă și în detectarea vehiculelor care schimbă benzile sau efectuează manevre complexe.

Cu toate acestea, utilizarea senzorilor laser poate fi influențată de condițiile atmosferice severe, precum ceața densă, precipitațiile abundente sau depunerile de zăpadă, care pot dispersa fasciculul sau reduce claritatea reflexiei. În practică, aceste limitări sunt compensate prin calibrarea periodică a senzorilor și integrarea cu alte tehnologii complementare, cum ar fi radarul sau camerele video de înaltă rezoluție.

Exemplu: Vitronic PoliScan Speed

Acest echipament radar emite impulsuri laser care, prin efect Doppler și măsurarea timpului de zbor, determină viteza și poziția precisă a fiecărui vehicul. Analizează conturul vehiculului 2D sau 3D pentru clasificare: autoturisme, autocamioane, motocicletă, vehicule cu remorcă.¹⁶ Totodată, poate detecta simultan mai multe vehicule pe benzi diferite, indiferent de direcție. Măsoară lungimea, înălțimea și poate estima chiar numărul de axe (prin corelare cu conturul și lungimea).

¹⁶ VITRONIC, „POLISCAN Speed: Seamless Speed Enforcement System.” Disponibil la <https://www.vitronic.com/en-us/traffic-technology/speed-enforcement>. Accesat ultima dată la 21.10.2025.

Prin integrarea unei unități de procesare dedicate și a unui modul de captură imagistică de înaltă rezoluție, *PoliScan FMI* poate identifica simultan mai multe vehicule aflate pe benzi diferite, clasificându-le în funcție de lungime, contur și viteză instantanee. Sistemul este proiectat să funcționeze eficient indiferent de condițiile meteorologice, fiind dotat cu iluminare infraroșu pentru operare nocturnă și cu mecanisme de criptare și protecție împotriva tentativelor de bruijaj sau manipulare.

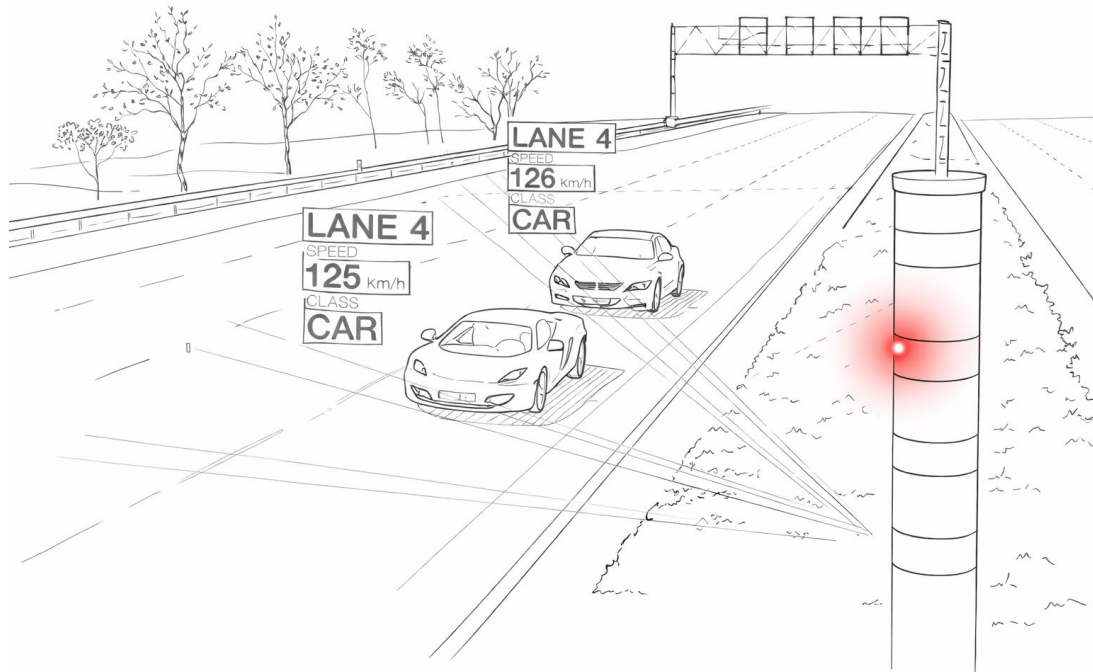


Figura 2.14. Detector laser

Acesta este compus din:

- Unitate de emisie-recepție cu scanner laser rotativ sau cu fereastră fixă.
- Sistem optic cu lentile de colimare și oglinzi rotative pentru scanare pe un unghi larg.
- Modul de prelucrare integrat care face interpretarea semnalului reflectat și clasificarea țintei.
- Interfață de comunicare (cablu/fiber optic sau wireless) cu serverele centrale de management al traficului.

Poate fi montat în punct fix pentru:

- Control automat al vitezei (radare fixe) pe drumuri urbane și autostrăzi.
- Măsurarea vitezei medii pe tronsoane lungi.
- Sisteme de taxare automată cu clasificare la barieră.
- Zone de control acces cu restricții de greutate/înălțime.

Tabel 2.1. Caracteristici tehnice

Parametru	Specificație
Tehnologie de detecție	LIDAR cu scanare multi-punct, efect Doppler
Domeniu de viteză	10–320 km/h
Precizie măsurare	± 3 km/h (sub 100 km/h); $\pm 3\%$ (peste 100 km/h)
Distanță de detecție	75–150 m (în funcție de amplasare și unghi)
Capacitate benzi	Monitorizare simultană multi-bandă
Clasificare vehicule	Lungime, contur, număr de axe, viteză instantanee
Imagini	Foto color HD, iluminare IR pentru noapte
Identificare	Recunoaștere automată număr înmatriculare
Montare	Fixă (stâlp, portal) sau mobilă (trepied, vehicul)
Conectivitate	Ethernet, Wi-Fi, 4G LTE
Protecție	Anti-bruiaj, criptare date, protecție fizică
Aplicații principale	Control viteză punctuală, control tronson, benzi speciale, tuneluri, zone urbane

Printre aplicațiile concrete ale detecției laser se numără radarele fixe și mobile de măsurare a vitezei, porturile de clasificare a traficului pe drumurile cu taxare, sisteme de monitorizare a traficului greu la punctele de control de greutate în mișcare (WIM) și soluții avansate de supraveghere pentru zone cu risc crescut de accidente. Integrarea cu platforme de procesare date permite analiza în timp real a parametrilor traficului și transmiterea automată a alertelor către autorități.

2.2.6. Detecția video și procesarea imaginilor pentru identificarea vehiculelor

Tehnologiile de detecție video aplicate în monitorizarea traficului rutier au cunoscut o dezvoltare accelerată în ultimele două decenii, pe fondul avansului camerelor digitale de înaltă rezoluție, al creșterii capacităților de procesare în timp real și al algoritmilor de recunoaștere vizuală.

Video detectia utilizând camere video fixe

Un sistem tipic de detecție video pentru trafic este compus dintr-o rețea de camere de supraveghere (camere fixe), montate pe stâlpi, portaluri, poduri sau clădiri strategice, și o unitate centrală de procesare video (*Video Processing Unit* – VPU) echipată cu algoritmi specializați de analiză de imagini.

Aceste sisteme operează pe principiul analizei fluxurilor video transmise în timp real, extrăgând parametri esențiali precum prezența vehiculului, viteza de deplasare, direcția, clasa vehiculului (autoturism, autoutilitară, autobuz, motocicletă), dar și comportamentele dinamice: schimbări bruște de bandă, opriri neregulamentare sau treceri pe culoarea roșie a semaforului.

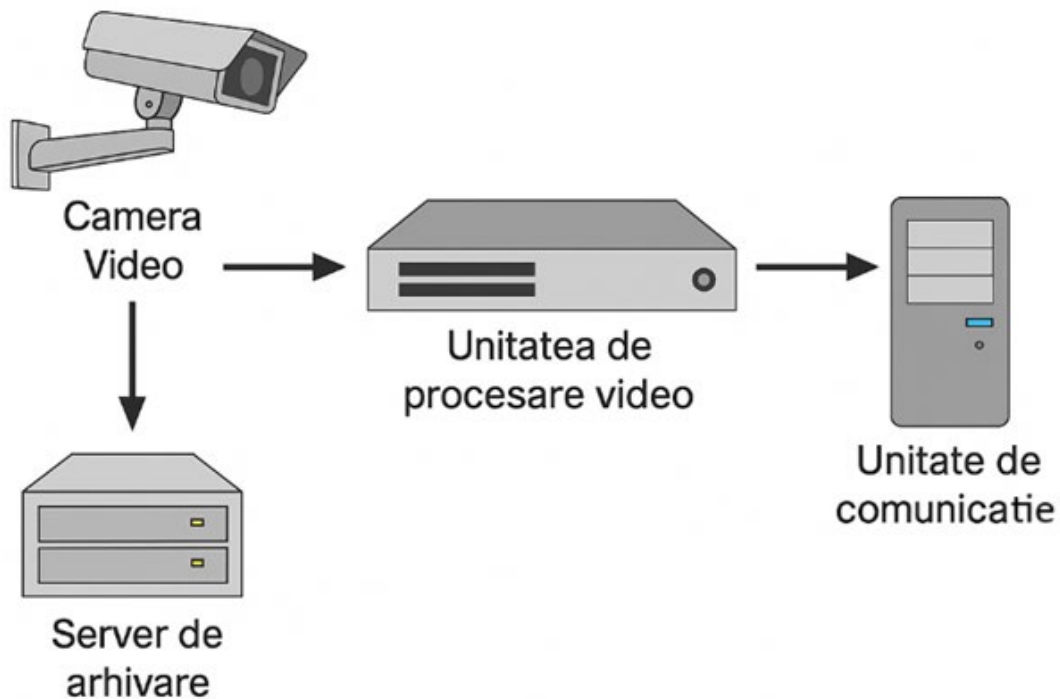


Figura 2.15. Schița tehnică a detecției video cu cameră fixă

Algoritmii de procesare video includ metode avansate de extragere a fundalului (*Background Subtraction*), flux optic (*Optical Flow*), detecția conturului (*Edge Detection*) recunoaștere de contur și clasificare bazată pe rețele neuronale convoluționale (CNN). Un element îl reprezintă modulele de recunoaștere automată a numerelor de înmatriculare, integrate direct în fluxul de procesare, care permit identificarea unică și legală a vehiculului.

Printre avantajele detecției video se numără flexibilitatea ridicată în acoperirea simultană a mai multor benzi de circulație, capacitatea de a colecta un volum mare de date fără infrastructură invazivă, integrarea facilă în sisteme ITS și posibilitatea de arhivare și audit ulterior.

Datele brute sunt stocate local sau transmise către centre de comandă și control prin rețele securizate (fibra optică, rețele wireless criptate sau 5G). La nivel de arhitectură, un sistem modern de detecție video poate integra și funcționalități AI (Inteligența Artificială) de recunoaștere facială (acolo unde legislația permite), detecția automată a comportamentelor agresive, numărarea pietonilor și bicicliștilor sau generarea automată de alerte în caz de incidente.

Calitatea imaginii este un factor decisiv la video detecție, astfel că rezoluțiile *Full HD* și 4K, iluminatoarele IR integrate și funcțiile WDR (*Wide Dynamic Range*) asigură performanțe stabile și pe timp de noapte, pe ploaie sau ninsoare. Totodată, pentru sporirea acurateții, multe sisteme integrează în sistem camere termice, capabile să compenseze limitările vizuale cauzate de condiții meteorologice severe sau iluminat insuficient.

Din punct de vedere operațional, sistemele video de detecție și procesare imagini se integrează ușor cu semaforizarea inteligentă, panourile VMS (*Variable Message Signs*) și bazele de date centralizate, permițând implementarea strategiilor de *Adaptive Traffic Control* și *Incident Management*.

Un alt avantaj major îl reprezintă caracterul scalabil, astfel că, aceleași echipamente pot fi extinse modular pentru a monitoriza noi intersecții sau sectoare de drum, fără intervenții fizice majore asupra infrastructurii rutiere.

Provocările sunt reprezentate îndeosebi de condițiile de iluminare scăzută, ploaia torențială, ceața densă sau reflexiile puternice pot reduce acuratețea identificării și clasificării vehiculelor. De aceea, se recomandă calibrarea periodică a camerelor, actualizarea soft-ului și menținerea lentilelor curate și corect focalizate.

Exemplu: TrafiCAM X-Stream Vehicle Video Detection

Conform producătorului FLIR, sistemul *TrafiCam X-stream* detectează și monitorizează prezența vehiculelor pe bază de video și transmite informațiile către controlerul de trafic.¹⁷



Figura 2.16. Model de cameră video fixă cu panou solar integrat, pentru preluare de imagini din trafic

¹⁷ FLIR, „TrafiCam x-stream: Vehicle Presence and Data Collection Sensor.” Disponibil la <https://www.flir.com/products/flir-trafficam-x-stream/>. Accesat la data de 23.10.2025.



Figura 2.17. Program de urmărirea a traficului observat de camera video fixă

În contextul video detecției traficului cu camere fixe, se utilizează cel mai frecvent tehnica potrivirii șabloanelor, care se referă la compararea imaginilor video în timp real cu șabloane predefinite (de ex. contururi, siluete, forme caracteristice ale vehiculelor) pentru a recunoaște automat prezența, tipul, poziția sau mișcarea acestora.

Tehnica de potrivire a șabloanelor (*Template Matching*) este un algoritm clasic de viziune computerizată, utilizat pentru a detecta, localiza și identifica obiecte de interes într-o imagine sau într-un flux video, prin compararea secvențelor de pixeli cu un model prestabilit (șablon).

Din punct de vedere tehnic, definirea șablonului se face urmând o serie de pași, într-un limbaj de programare precum Python sau OpenCV astfel:

- Se selectează o imagine de referință a obiectului ce trebuie detectat (ex. contur frontal/lateral al unui vehicul, forma unei plăcuțe de înmatriculare, silueta unui pieton).
- Algoritmul parcurge imaginea (cadru video) pixel cu pixel, căutând regiuni în care sub-imaginea se potrivește cu șablonul.
- Pentru fiecare poziție, se calculează un scor de potrivire (ex. corelare încrucișată normalizată, SSD – *sum of squared differences*, NCC – *normalized cross correlation*) între șablon și sub-imaginea selectată.
- Dacă scorul depășește un prag (*threshold*) stabilit, sistemul marchează zona ca „detecție validă”.

Aceasta tehnică poate fi combinată cu urmărirea obiectelor (*object tracking*) și cu recunoașterea numerelor de înmatriculare pentru a extrage mai multe date (viteză, traiectorie, clasă vehicul).

Câteva dintre avantajele acestei tehnici sunt:

- Implementare relativ simplă (algoritm robust, nefiind dependent de rețele neuronale complexe)
- Eficient pentru forme și obiecte bine definite și repetitive (ex. contur vehicule, faruri)
- Performant în condiții controlate (iluminare constantă, unghi fix, fundal stabil)

Limitările sunt următoarele:

- Sensibilitate la variații de scară și rotație pentru că șablonul trebuie să corespundă foarte bine cu imaginea reală; dacă vehiculul este mai mic/mai mare sau rotit, scorul de potrivire scade drastic (decât dacă se folosesc șabloane multiple sau metode *multi-scale*).
- Performanță slabă în medii cu variații mari de lumină, umbre, ploaie, zăpadă etc.
- Eficiență scăzută la detectarea obiectelor parțial ascunse sau suprapuse.

Deși aceasta metodă este printre primele utilizate în video detecție și este aplicată și astăzi pentru majoritatea camerelor de supraveghere trafic fixe, totuși, potrivirea de șabloane începe ușor să fie suplinită sau completată cu tehnici de viziune computerizată bazată pe rețele neuronale convoluționale (CNN), care pot învăța automat caracteristicile și pot detecta obiectele indiferent de scară, unghi sau condiții de iluminare.

Video detecția utilizând camere video mobile (dronă)

Video detecția utilizând camere video mobile montate pe drone reprezintă una dintre cele mai moderne și flexibile soluții pentru monitorizarea fluxurilor de trafic, studiile de circulație și supravegherea în timp real a infrastructurii rutiere. Această tehnologie combină avantajele mobilității ridicate cu perspectivele aeriene extinse, oferind date complexe și detaliate despre comportamentul participanților la trafic, densitatea fluxurilor și distribuția acestora pe intervale orare și spațiale.

Sistemul este alcătuit dintr-o dronă dotată cu una sau mai multe camere video de înaltă rezoluție, echipamente de stabilizare optică, sisteme GPS pentru localizare precisă și module de transmisie a datelor în timp real către o stație de sol. Camerele pot fi fixe sau cu capacitate de rotire și zoom automat, permițând captarea imaginilor sub unghiuri variabile și la altitudini ajustabile, în funcție de specificul monitorizării.

Principalul avantaj al utilizării dronelor constă în capacitatea de a acoperi rapid suprafețe extinse, de a accesa zone greu abordabile de la sol și de a surprinde din unghiuri verticale sau oblice fluxurile de trafic, intersecțiile complexe și punctele critice de congestie. Datele video obținute pot fi analizate automat prin algoritmi de procesare a imaginilor, care identifică vehiculele, determină traiectorii, calculează viteze, distanțe intervehiculare și tipuri de vehicule.



Figura 2.18. Dronă și controler

În plus, drona poate fi programată să urmeze trasee predefinite sau să efectueze zboruri autonome repetitive, ceea ce permite realizarea de comparații între intervale diferite și monitorizarea evoluției traficului în timp. Un alt avantaj major este minimizarea impactului asupra traficului, nefiind necesară instalarea de echipamente fixe pe infrastructură.

Aplicabilitatea acestui tip de detecție este foarte largă: de la studiile de capacitate și comportament rutier, la monitorizarea șantierelor de construcții rutiere, controlul traficului în zonele urbane aglomerate, supravegherea marilor intersecții și până la intervenții rapide în cazul unor incidente sau blocaje.

Limitările sunt însă legate de condițiile meteorologice nefavorabile (vânt puternic, ploaie, ceață densă), durata limitată a zborului (dependentă de capacitatea bateriei) și necesitatea respectării reglementărilor legale privind operarea dronelor în spațiul aerian, inclusiv obținerea autorizațiilor de zbor și asigurarea zonelor de siguranță.

În cadrul video-detecriei realizate cu drone, software-ul de procesare a imaginilor reprezintă următorul pas în transformarea datelor brute (înregistrările video) în informații utile, precise și ușor de interpretat. În absența unor soluții performante de analiză automată, volumul imens de date captat de camerele de la bordul dronelor ar necesita un efort semnificativ de prelucrare manuală, ceea ce ar limita sever eficiența și aplicabilitatea acestei tehnologii.

Soft-urile dedicate procesării imaginilor video provenite de la drone sunt concepute să identifice automat obiectele de interes, în cazul traficului rutier, vehiculele de diferite tipuri, și să extragă parametrii esențiali: traiectorii, viteze, timpi de deplasare, distanțe intervehiculare, lungimea coloanelor, comportamente de schimbare a benzii sau timpi de întârziere la intersecții. Prin algoritmi de inteligență artificială, recunoaștere vizuală și învățare automată, aceste aplicații îmbunătățesc semnificativ acuratețea decriei și reduc erorile umane.

Mai mult decât simpla identificare a vehiculelor, soft-urile moderne integrează module de *tracking multi-obiect*, care pot urmări simultan zeci sau sute de vehicule pe întregul câmp vizual, corelându-le pozițiile de la un cadru la altul. Această capacitate este deosebit de importantă pentru studiile de comportament dinamic și simulările avansate de fluxuri rutiere.

O altă funcționalitate importantă este filtrarea și corectarea imaginilor, dronele operează în medii variabile, unde reflexiile solare, umbrele, norii sau schimbările bruște de lumină pot afecta calitatea capturilor. Algoritmii de corecție automată asigură stabilizarea imaginii, ajustarea contrastului și eliminarea zgomotului vizual, astfel încât informația extrasă să rămână relevantă și fiabilă.

În plus, aceste aplicații pot integra funcții GIS (Sisteme Informaționale Geografice) care permit suprapunerea traseelor vehiculelor pe hărți digitale și realizarea de analize spațiale complexe, de exemplu, identificarea punctelor critice de congestie sau a comportamentelor atipice de circulație.

Inițial soft-urile de decrie a traficului prin procesare de imagine s-au dezvoltat utilizând la bază alte soft-uri de programare precum MATLAB (*Image Processing Toolbox*), Python sau OpenCV, însă o dată cu avansarea cercetărilor în domeniu, specialiștii în programare în colaborare cu specialiștii în analiza traficului rutier au început să dezvolte programe de sine stătătoare care nu doar să detecteze și să contorizeze vehicule, ci să le și clasifice, să poată determina viteza de circulație sau numărul de înmatriculare (în poziția camerei în unghi față de axul drumului).

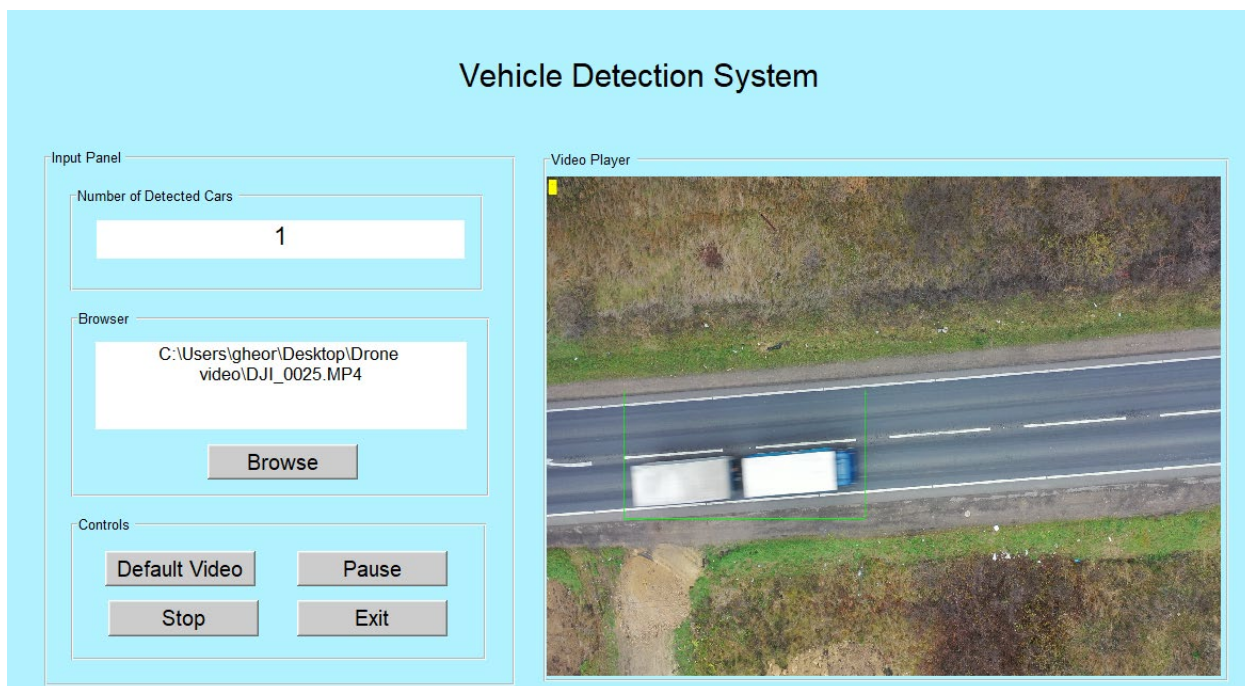


Figura 2.19. Interfața unei aplicații MATLAB – *Image Processing*

Există pe piață softuri comerciale folosite în acest domeniu, la nivel internațional, pentru procesarea imaginilor provenite de la drone, în scopul monitorizării și analizării traficului rutier. Aceste soft-uri au în comun automatizarea muncii de observare, reducerea erorilor umane și obținerea unor date de trafic detaliate, exacte și disponibile rapid, însă momentan, nu în timp real.

DataFromSky reprezintă unul dintre cele mai avansate softuri dedicate analizei traficului rutier pe baza imaginilor aeriene obținute cu drone sau camere video fixe. Conform DataFromSky, platforma transformă fluxurile video în date de trafic prin analiză automată folosind tehnologie de inteligență artificială (*Artificial Intelligence* - AI) și algoritmi de procesare video. Acest sistem integrează algoritmi puternici de inteligență artificială și viziune computerizată, care permit identificarea, urmărirea și clasificarea automată a vehiculelor și pietonilor, cu o precizie spațială ridicată, la nivel de traiectorie 2D și 3D.¹⁸

Printre funcționalitățile sale se numără numărarea automată a vehiculelor pe categorii, determinarea vitezei instantanee, analiza comportamentului rutier (opriți, întoarceri, depășiri) și generarea de rapoarte vizuale complexe, inclusiv hărți de căldură (*heatmaps*) și statistici de flux.

¹⁸ DataFromSky, „DataFromSky: Deep Traffic Video Analysis and Vehicle Detection Platform.” Disponibil la <https://datafromsky.com/>. Accesat la data de 23.10.2025.

De asemenea, datele obținute pot fi exportate în formate compatibile cu simulatoarele de trafic consacrate, precum VISSIM, Aimsun sau SUMO, pentru validarea scenariilor de optimizare a infrastructurii. Soluția permite atât procesarea offline a materialelor video înregistrate, cât și analiza în timp real, fiind utilizată pe scară largă de municipalități, institute de cercetare și consultanți în inginerie rutieră.

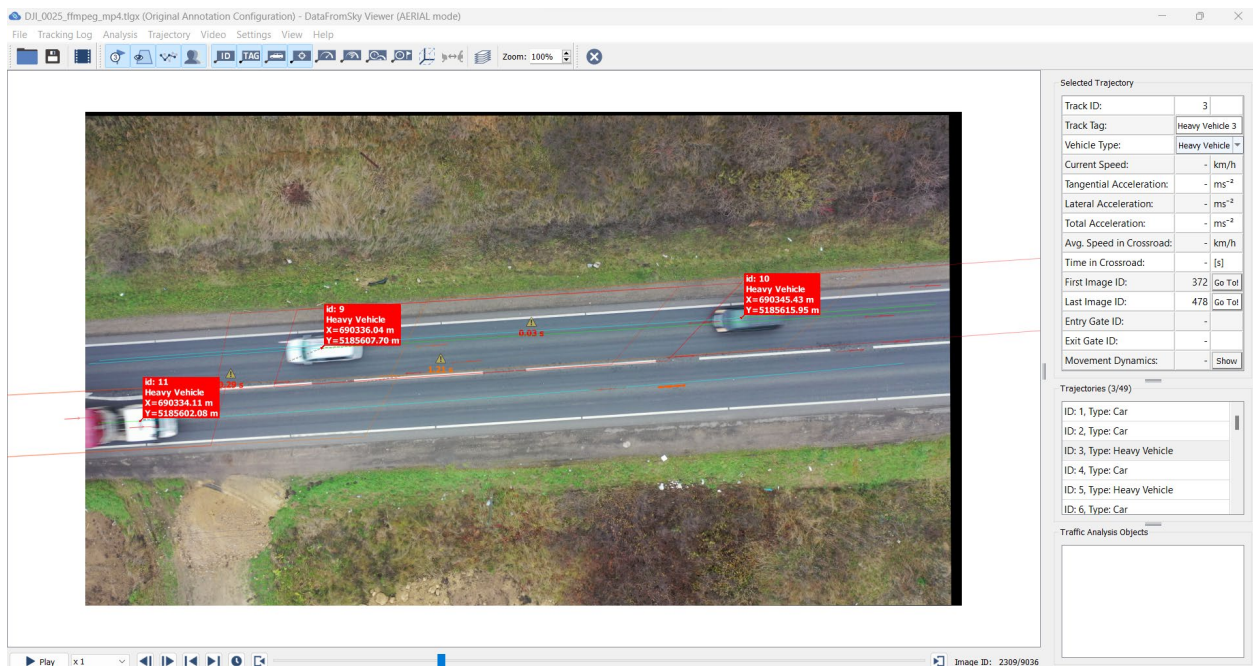


Figura 2.20. Interfața soft-ului de procesare de imagine DataFromSky

Survey report		DATA FROM SKY	
DJI_0025_ffmpeg.mp4			
Survey overview			
Start time			11:01:46
End time			11:06:45
Total period			00:05:00
Location			
Analysis Minor Period			05:00
Analysis Major Period			30:00
Analysis Overall Period			Disabled
Intersection type			
Description			
Overall statistics			
Number of tracked objects			49
Car count			17
Medium Vehicle count			2
Heavy Vehicle count			30
Bus count			0
Motorcycle count			0
Bicycle count			0
Pedestrian count			0

Figura 2.21. Raport general generat de DataFromSky

Drone2Map, dezvoltat de *Esri* este un alt instrument performant utilizat pentru prelucrarea imaginilor captate de drone, cu aplicații variate, de la cartografiere până la evaluări detaliate ale infrastructurii rutiere. În contextul monitorizării traficului, Drone2Map permite generarea de ortofotoplanuri, modele 3D și rețele de puncte dense, facilitând interpretarea fluxurilor de vehicule pe segmente rutiere extinse sau în intersecții aglomerate.¹⁹

Prin integrarea nativă cu ArcGIS, acest soft sprijină fluxuri de lucru complexe, în care datele spațiale sunt combinate cu alte seturi de informații GIS, optimizând deciziile privind managementul traficului și planificarea urbană.

Deși nu include module AI specializate exclusiv pentru urmărirea vehiculelor, capacitatea de a obține date geospațiale precise și ușor de corelat cu alte straturi GIS îl recomandă drept un instrument util pentru proiectele de trafic la scară mare.

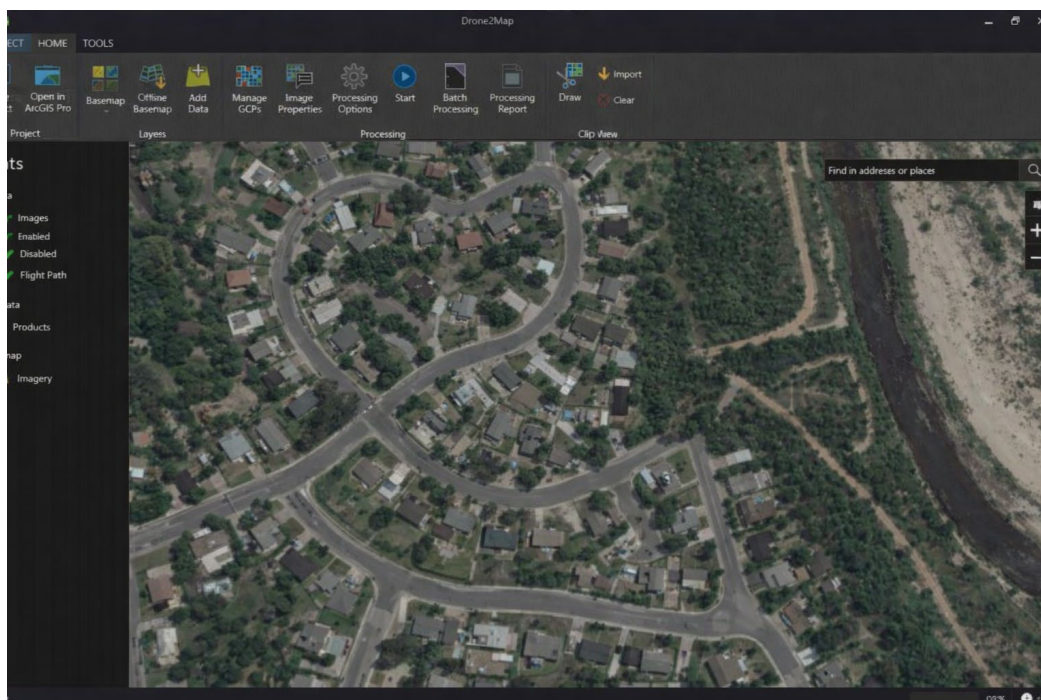


Figura 2.22. Interfața soft-ului de procesare Drone2Map și ArcGIS

Pix4D, recunoscut ca lider de piață în fotogrammetrie aeriană, oferă soluții robuste pentru generarea de modele digitale de teren și ortomozaicuri de înaltă rezoluție. În analiza traficului, Pix4D poate fi folosit pentru a crea seturi de date 3D precise ale infrastructurii rutiere, utile în evaluarea capacității drumurilor, identificarea obstacolelor sau planificarea lucrărilor de modernizare.²⁰

¹⁹ Esri, „ArcGIS Drone2Map: 2D & 3D Photogrammetry and Reality Capture Software.” Disponibil la <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-reality/products/arcgis-drone2map/>. Accesat la data de 24.10.2025.

²⁰ Pix4D, „Pix4D: Professional Photogrammetry and Drone Mapping Software.” Disponibil la <https://www.pix4d.com/>. Accesat la data de 24.10.2025.

Prin exportul datelor sub formă de modele vectoriale și nori de puncte, specialiștii pot combina aceste rezultate cu aplicații de simulare sau cu module suplimentare de procesare video, astfel încât să obțină informații detaliate despre densitatea fluxurilor de vehicule.

Deși funcționalitățile de urmărire automată sunt limitate, Pix4D rămâne o soluție de bază pentru obținerea de imagini aeriene de referință și integrarea lor în proiectele de analiză a traficului.

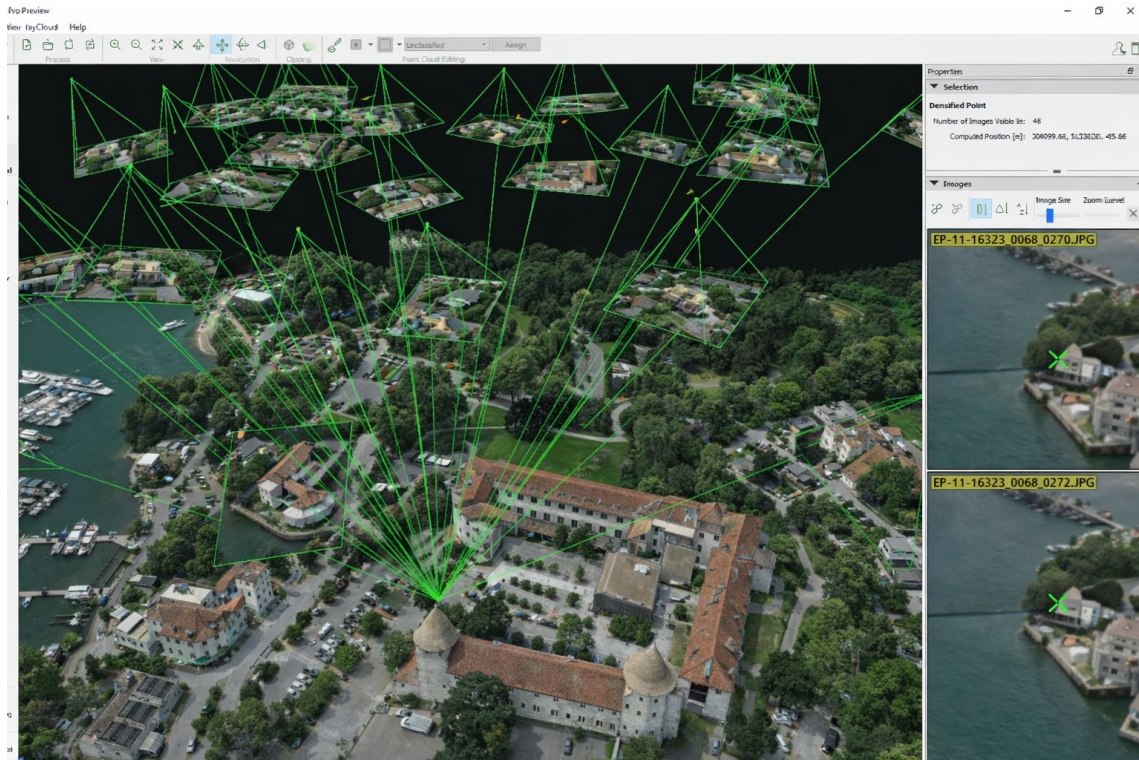


Figura 2.23. Interfața soft-ului de procesare Pix4D

Aspectul care face diferența între diverse tipuri de soft-uri îl reprezintă capacitatea de raportare automată. Majoritatea soluțiilor software generează rapoarte standardizate, tabele de date, grafice de flux și statistici descriptive, direct exportabile în formate compatibile cu platformele de management al traficului sau cu aplicațiile de planificare urbană.

În practică, combinația dintre drone și softuri inteligente de procesare video permite autorităților rutiere, firmelor de consultanță în infrastructură și operatorilor de trafic să obțină o imagine detaliată și obiectivă a condițiilor reale de circulație foarte detaliate, imposibil de atins prin metodele tradiționale de măsurare.

Astfel că valoarea reală a detecției video cu drone nu constă doar în componenta hardware (echipamentele de filmare și zbor), ci în combinația dintre captura aeriană și componenta analitică a softurilor de procesare, care transformă cadrele video într-o sursă de date operaționale, fiind o bază pentru decizii strategice în domeniul managementului traficului rutier.

2.2.7. Tehnologii emergente și soluții integrate pentru monitorizarea inteligentă a traficului rutier

În contextul tranziției către orașe inteligente și infrastructuri rutiere interconectate, tehnologiile emergente de monitorizare a traficului rutier capătă un rol în completarea și optimizarea metodelor clasice de detecție. Aceste soluții avansate răspund nevoii tot mai urgente de colectare a datelor cu un grad ridicat de acuratețe spațială și temporală, permițând o evaluare în timp real a dinamicii fluxurilor de vehicule și pietoni.

Una dintre direcțiile tehnologice semnificative o reprezintă **detecția prin senzori magnetometrici discreți**, instalați direct pe suprafața carosabilului sau îngropați superficial. Acești senzori măsoară variația câmpului magnetic generată de masele metalice ale vehiculelor aflate în mișcare, oferind informații precise despre trecerea, viteza și direcția acestora. Față de buclele inductive clasice, magnetometrele prezintă avantaje în ceea ce privește flexibilitatea instalării și costurile de mentenanță redusă.

Senzorii magnetometrici reprezintă o evoluție a principiului clasic al detecției prin inducție electromagnetică, fiind proiectați pentru a oferi o soluție flexibilă, compactă și cu cerințe reduse de întreținere. Acești senzori sunt instalați la nivelul suprafeței carosabile sau ușor îngropați, detectând perturbațiile în câmpul magnetic terestru provocate de masele metalice ale vehiculelor aflate în mișcare.

Comparativ cu buclele inductive tradiționale, senzorii magnetometrici necesită lucrări de infrastructură minime și pot fi instalați rapid, inclusiv în zone cu trafic intens, unde restricționarea circulației trebuie minimizată. În plus, aceștia pot funcționa autonom pe baza unor surse de energie integrate (baterii cu durată lungă de viață) și pot comunica wireless cu unitățile de procesare centralizate.

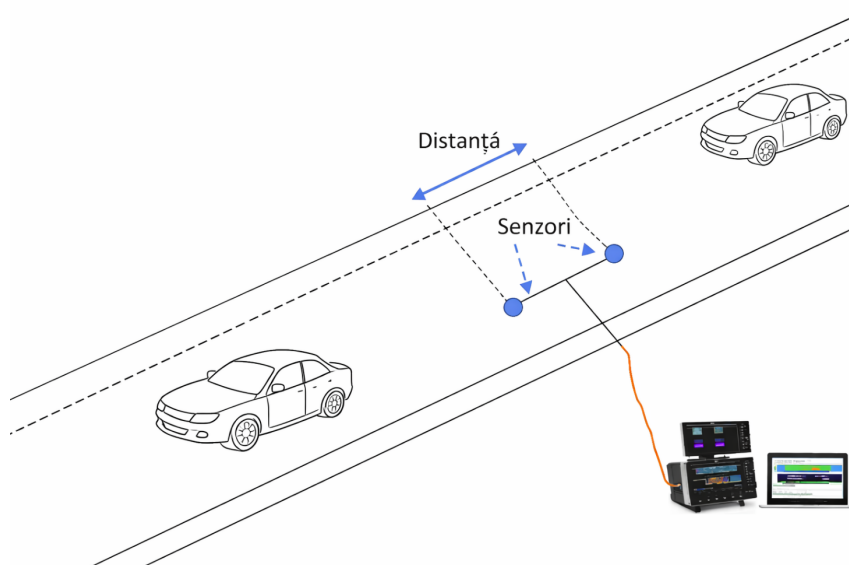


Figura 2.24. Senzori magnetometrici

O altă soluție cu aplicabilitate tot mai extinsă o constituie tehnologia **LiDAR (Light Detection and Ranging)**. Aceasta utilizează un fascicul laser care scanează zona de interes tridimensional, permițând nu doar identificarea vehiculului, ci și determinarea conturului său, a înălțimii, a direcției de deplasare și a vitezei. Spre deosebire de detectoarele laser convenționale, LiDAR furnizează o imagine 3D de înaltă rezoluție, fiind utilizată inclusiv în vehiculele autonome și în intersecțiile inteligente dotate cu sisteme de ghidare adaptivă.

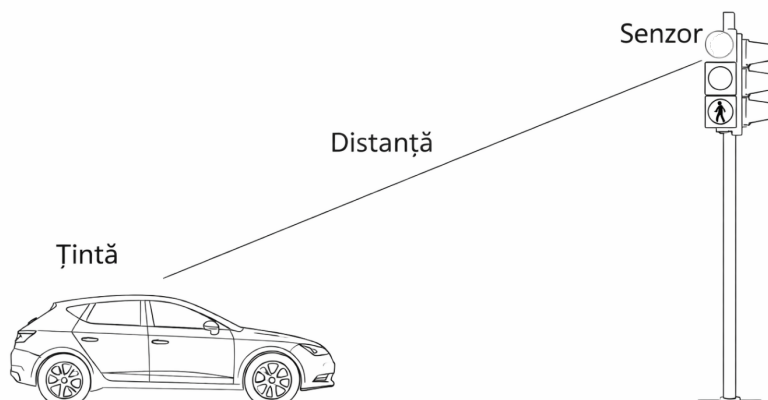


Figura 2.25. Principiul de detecție LiDAR

LiDAR-ul este util în intersecțiile inteligente, trecerile de pietoni sau punctele de colectare automată a taxelor, unde oferă informații detaliate despre fluxul de trafic, inclusiv în condiții de iluminare slabă sau pe timp de noapte. Prin corelarea datelor LiDAR cu sisteme radar și camere video, se obțin modele hibride de detecție cu acuratețe crescută.

Exemplu: Radarul portabil cu cameră LTI 20-20 TruCAM

Conform Laser Technology Inc., LTI 20/20 TruCAM® este un dispozitiv portabil de măsurare a vitezei care combină tehnologia lidar cu o cameră video pentru înregistrarea probelor și recunoaștere automată a numerelor de înmatriculare.²¹ Este omologat internațional și implementat recent (anul 2025) în dotarea Poliției Române în cadrul eforturilor de modernizare a dispozitivelor de supraveghere a traficului rutier.

TruCAM utilizează tehnologia LiDAR pentru determinarea vitezei prin măsurarea timpului de întoarcere a impulsurilor laser reflectate de vehicul. Spre deosebire de radarele clasice Doppler cu microunde, LiDAR-ul permite izolarea precisă a unei singure ținte în trafic intens, reducând riscul de măsurători eronate cauzate de vehicule adiacente.

²¹ Laser Technology Inc., „LTI 20/20 TruCAM® II: Handheld Photo/Video LIDAR Speed Enforcement Device.” Disponibil la <https://lasertech.com/product/trucam-ii-speed-enforcement-laser/>. Accesat la data de 24.10.2025.

Fasciculul laser, cu un unghi de divergență foarte mic, este dirijat spre obiectul în mișcare, iar timpul de propagare și deplasarea față de poziția inițială permit calculul vitezei instantanee și determinarea distanței exacte.

Tabelul 2.2. Specificații tehnice

Caracteristică	Descriere
Tehnologie de măsurare	LIDAR (impulsuri laser, <i>time-of-flight</i>)
Lungime de undă laser	905 nm (spectru infraroșu aproape invizibil)
Putere laser emisă	≤ 5 mW, Clasa 1M conform IEC 60825-1
Distanță de operare	15 m – 1 200 m
Precizie măsurare viteză	± 2 km/h
Interval viteze măsurabile	0 – 320 km/h
Timp de reacție	< 0,3 s
Sistem optic vizare	Vizor cu mărire optică × 7
Cameră digitală integrată	Rezoluție foto: 3,2–5 MP; Rezoluție video: HD (720p)
Stocare date	Card SD, capacitate până la 32 GB
Metadate asociate	Număr înmatriculare (ANPR), coordonate GPS, dată/oră, viteză, distanță țintă
GPS integrat	DA, precizie < 2 m
Conectivitate	Port USB, Bluetooth (opțional)
Autonomie	~ 8–10 ore de funcționare continuă
Greutate	~ 1,5 kg (inclusiv acumulator)
Operabilitate meteo	Certificat IP54 (rezistență la praf și stropi de apă)
Certificare metrologică	Conform legislației naționale și directivelor OIML R91

TruCAM captează secvențe video și fotografiile cu vehiculul vizat, incluzând clar numărul de înmatriculare, viteza măsurată, data, ora, coordonatele GPS și alte *metadate* relevante, servind ca probe juridice solide în instanță.

Are un algoritm integrat de recunoaștere video a plăcuțelor de înmatriculare, cu capacitate de detecție și procesare în timp real, fiecare captură fiind asociată cu un fișier unic, criptat, cu verificare de integritate, prevenind manipularea datelor.

Sistemul efectuează proceduri de auto-testare și autocalibrare la pornire și periodic, conform standardelor metrologice.

Limitările echipamentului radar sunt:

- Performanța maximă care se obține doar în condiții meteo favorabile; totuși, radarul rămâne operațional și în condiții de vizibilitate redusă (ceață moderată, precipitații).

- Necesită poziționare stabilă din partea operatorului și respectarea protocolului de țintire și captură.

În România, *TruCAM* este omologat și inclus treptat în dotarea structurilor rutiere din județe cu flux intens de trafic. Obiectivul principal este creșterea eficienței monitorizării și reducerea comportamentului rutier agresiv. Utilizarea sa este reglementată de legislația privind verificările metrologice periodice și standardele de utilizare în spațiul public. Viteza de reacție permite detectarea vehiculelor aflate în depărtare și apropiere rapidă, fiind util pe drumuri naționale și autostrăzi.

În paralel, odată cu extinderea rețelelor IoT și a comunicațiilor de tip 5G, se dezvoltă rapid sistemele de monitorizare bazate pe vehicule conectate (**V2X – Vehicle-to-Everything**). O direcție revoluționară o constituie integrarea vehiculelor conectate în infrastructura inteligentă prin tehnologia V2X (Vehicle-to-Everything). Aceasta include comunicarea V2N (vehicle-to-network), V2V (vehicle-to-vehicle), V2I (vehicle-to-infrastructure), V2P (vehicle-to-pedestrian) și V2H (vehicle-to-house). Prin aceste soluții, vehiculele devin emițători și receptori de date în timp real, comunicând informații despre poziție, viteză, accelerație, direcție de deplasare și condițiile de trafic către infrastructură și alte entități conectate. Această abordare transformă vehiculul dintr-un obiect pasiv într-un nod activ al rețelei inteligente de transport, contribuind la optimizarea fluxurilor de trafic, creșterea siguranței rutiere și prevenirea congestiilor.

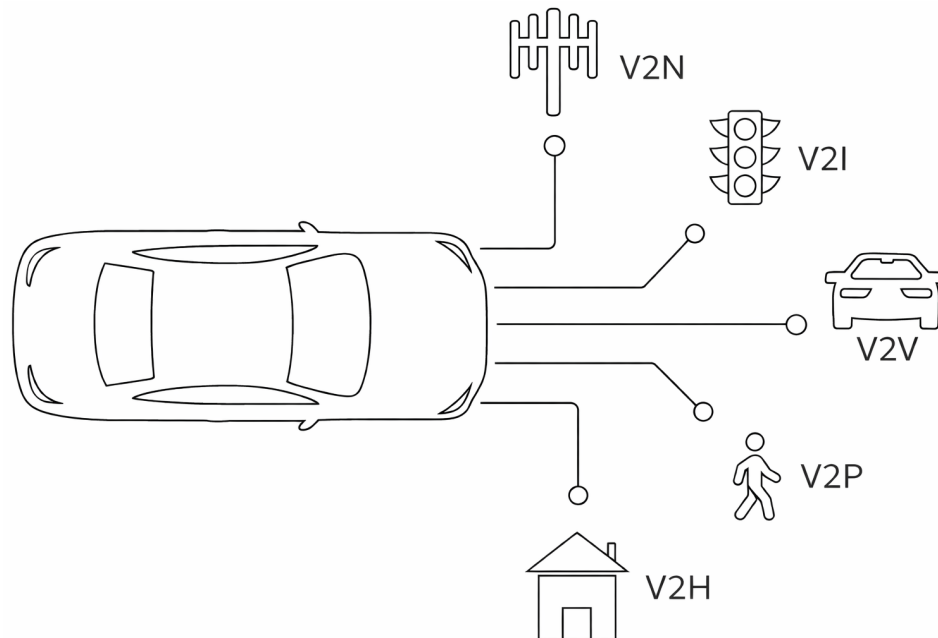


Figura 2.26. Conexiunea vehiculului cu mediul înconjurător: V2N – Vehicle – to – Network (vehicul – rețea); V2I – Vehicle – to – Infrastructure (vehicul – infrastructură); V2V – Vehicle – to – Vehicle (vehicul – vehicul); V2P – Vehicle – to – Pedestrian (vehicul – pieton); V2H – Vehicle – to – Home (vehicul – locuințe)

Conexiunea V2V se realizează prin comunicații directe, de obicei pe distanțe scurte, utilizând tehnologii dedicate, care permit schimbul rapid de mesaje între vehicule aflate în proximitate. Prin intermediul acestei legături, vehiculele transmit periodic mesaje de stare ce includ poziția în spațiu, viteza instantanee, direcția de deplasare și manevrele planificate. Aceste informații sunt utilizate pentru detectarea timpurie a situațiilor de risc, precum frânări bruște, coliziuni iminente sau blocaje locale, permițând reacții rapide atât din partea sistemelor de asistență ale vehiculului, cât și din partea infrastructurii de control al traficului.

Comunicarea V2I implică schimbul de date între vehicule și elementele infrastructurii rutiere inteligente, cum ar fi semafoarele adaptive, panourile cu mesaje variabile, stațiile de monitorizare a traficului. Prin această conexiune, vehiculul transmite date relevante pentru monitorizarea fluxului rutier, precum timpii de traversare a intersecțiilor, nivelul de ocupare a benzilor sau frecvența opririlor, iar infrastructura furnizează informații privind starea semafoarelor, restricțiile temporare, limitele dinamice de viteză sau evenimentele rutiere. În contextul detecției vehiculelor, V2I completează și validează datele obținute prin senzori clasici, reducând erorile și crescând acuratețea estimărilor privind densitatea și dinamica traficului.

Legătura V2N asigură conectarea vehiculului la rețelele de comunicații extinse, inclusiv infrastructuri celulare și platforme cloud. Prin această conexiune, datele colectate de vehicul sunt transmise către centrele de procesare, unde sunt agregate, analizate și corelate cu informații provenite din alte surse. V2N permite monitorizarea traficului la scară largă, realizarea de predicții privind evoluția fluxurilor rutiere și implementarea strategiilor de control adaptiv, bazate pe date în timp real. De asemenea, această legătură facilitează actualizarea continuă a sistemelor vehiculului și integrarea sa într-un ecosistem digital complex de tip „Smart City”.

Comunicarea V2P este orientată spre protejarea participanților vulnerabili la trafic, precum pietonii și bicicliștii, prin intermediul dispozitivelor mobile sau al echipamentelor purtabile conectate. Prin schimbul de informații de proximitate și poziție, vehiculele pot detecta prezența pietonilor chiar și în condiții de vizibilitate redusă, iar infrastructura poate semnaliza situațiile potențial periculoase. În contextul monitorizării traficului, V2P contribuie la identificarea zonelor cu risc ridicat și la adaptarea dinamică a măsurilor de siguranță rutieră.

Comunicarea V2H extinde conceptul de vehicul conectat către mediul rezidențial, permițând integrarea vehiculului cu sistemele inteligente ale locuinței. Deși impactul direct asupra detecției traficului este limitat, V2H contribuie indirect la optimizarea mobilității prin gestionarea eficientă a resurselor energetice, planificarea deplasărilor și integrarea vehiculului electric în rețeaua energetică inteligentă.

Prin combinarea acestor tipuri de comunicații, tehnologia V2X creează o infrastructură cooperativă în care vehiculele, infrastructura și utilizatorii schimbă informații în timp real. Această cooperare permite o detecție mult mai precisă a vehiculelor și a comportamentului acestora, depășind limitările sistemelor tradiționale bazate exclusiv pe senzori fixați în infrastructură și deschizând calea către un management rutier predictiv și adaptiv.

Astfel că, vehiculele devin emițători și receptori de date în timp real, comunicând informații despre poziție, viteză și condițiile de trafic către infrastructură și alte vehicule. Această abordare transformă vehiculul dintr-un simplu obiect pasiv într-un nod activ din rețeaua inteligentă de transport, contribuind la optimizarea fluxurilor și la prevenirea congestiilor.

Sisteme inteligente de control al vitezei pe sector (*Average Speed / Point-to-Point*)

Camerele inteligente care măsoară distanța și viteza între două puncte, cunoscute în domeniul rutier sub denumirile de sisteme de tip *average speed*, control al vitezei pe sector sau *point-to-point*, reprezintă o evoluție semnificativă față de radarele tradiționale care determină viteza unui vehicul într-un punct fix. Aceste sisteme nu urmăresc viteza instantanee, ci evaluează viteza medie de deplasare a unui vehicul pe o anumită secțiune de drum, oferind o imagine mai fidelă a comportamentului real de conducere.

Principiul de funcționare se bazează pe măsurarea indirectă a vitezei, prin raportarea distanței parcurse la timpul necesar pentru parcurgerea acesteia. Pe sectorul de drum monitorizat sunt amplasate două sau mai multe puncte de măsurare, echipate cu camere video. Prima cameră înregistrează momentul exact în care vehiculul trece prin punctul inițial (punctul A), capturând totodată numărul de înmatriculare. A doua cameră, amplasată la o distanță cunoscută de prima (punctul B), realizează o nouă înregistrare a aceluiași vehicul. Sistemul calculează intervalul de timp dintre cele două treceri și determină viteza medie utilizând relația fundamentală din fizică:

$$\text{viteza medie} = \text{distanța parcursă} / \text{timpul de deplasare}.$$

În situația în care viteza medie rezultată depășește limita legală impusă pe sectorul respectiv, sistemul poate genera automat o constatare a contravenției și poate declanșa procedura de sancționare.

Funcționarea acestor sisteme este posibilă datorită utilizării tehnologiei de recunoaștere automată a numerelor de înmatriculare (ANPR – *Automatic Number Plate Recognition*). Aceasta presupune captarea imaginii plăcuței de înmatriculare, procesarea digitală a

caracterelor și transformarea lor în date alfanumerice, ceea ce permite identificarea univocă a vehiculului în ambele puncte de măsurare și corelarea precisă a momentelor de trecere.

Radarele clasice de tip *spot* reprezintă sisteme de control al vitezei care efectuează măsurători punctuale, într-un amplasament fix sau mobil, determinând viteza instantanee a unui vehicul la momentul traversării unui punct de control bine definit. Aceste sisteme se bazează, în general, pe tehnologii radar sau LiDAR și sunt utilizate pe scară largă datorită simplității de instalare și operare. Totuși, caracterul lor punctual face ca eficiența în descurajarea comportamentelor periculoase să fie limitată, întrucât conducătorii auto pot adapta temporar viteza prin frânare bruscă în apropierea dispozitivului de măsurare, revenind ulterior la un regim de deplasare neconform. În consecință, radarele de tip *spot* contribuie în principal la reducerea vitezei locale, în imediata vecinătate a punctului de control, fără a asigura neapărat o respectare uniformă a limitelor de viteză pe întregul tronson de drum.

Comparativ cu radarele tip *spot*, sistemele de control al vitezei pe sector prezintă mai multe avantaje. În primul rând, ele nu pot fi eludate prin frânarea bruscă înaintea unui punct de control, deoarece monitorizarea se realizează pe întreaga lungime a sectorului. În al doilea rând, aceste sisteme încurajează respectarea constantă a limitelor de viteză, nu doar în proximitatea unei camere.

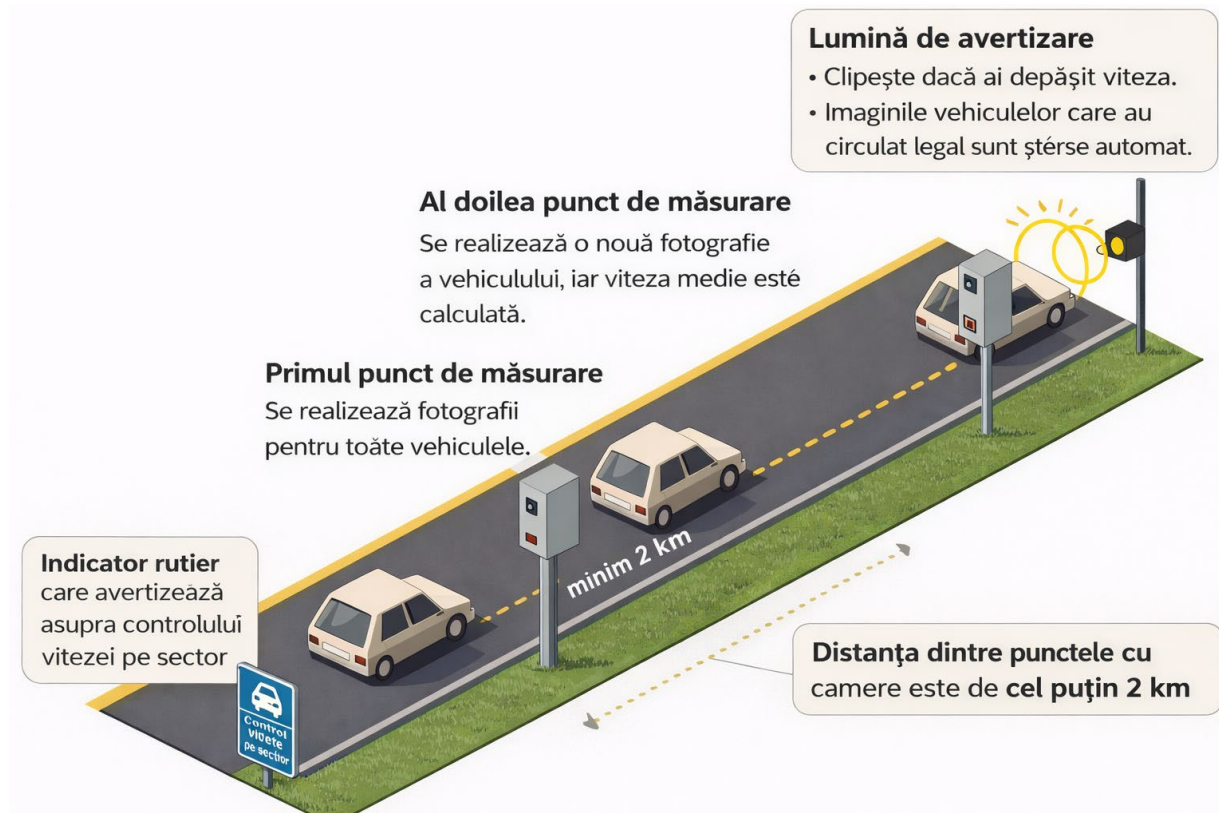


Figura 2.27. Sistem inteligent de control al vitezei pe sector

În plus, ele funcționează continuu, fără intervenție umană directă, și pot genera automat notificări de contravenție, ceea ce contribuie la creșterea eficienței aplicării legislației rutiere. Studiile europene în domeniul siguranței rutiere indică faptul că acest tip de control este mai eficient în reducerea accidentelor decât măsurarea punctuală a vitezei.

În România, introducerea acestor sisteme se realizează progresiv, în cadrul unor programe naționale de modernizare a monitorizării traficului, precum proiectul e-Sigur. Aceste sisteme sunt integrate în infrastructura Poliției Rutiere și sunt utilizate pentru monitorizarea vitezei, a respectării semnalizării rutiere și a altor abateri, cu posibilitatea transmiterii sancțiunilor direct către proprietarii vehiculelor.

Diferența dintre camerele clasice și cele de tip *average speed* constă în natura mărimii măsurate. Radarele clasice, bazate pe tehnologii radar sau laser, determină viteza instantanee a vehiculului într-un punct fix. În schimb, sistemele de control pe sector utilizează datele obținute prin recunoașterea plăcuței de înmatriculare și calculul timpului și distanței pentru a determina viteza medie pe un segment de drum, oferind o evaluare mai cuprinzătoare a comportamentului rutier.

Astfel, camerele inteligente de măsurare a vitezei între două puncte funcționează prin înregistrarea momentelor de trecere ale vehiculului în puncte distincte, identificarea automată a acestuia, calcularea vitezei medii pe sector și aplicarea automată a sancțiunilor în cazul depășirii limitelor legale. Datorită principiului lor de funcționare și nivelului ridicat de automatizare, aceste sisteme sunt considerate mai corecte, mai robuste și mai eficiente pentru creșterea siguranței rutiere decât metodele tradiționale de măsurare punctuală a vitezei.

Senzorii acustici și ultrasunetele reprezintă o altă categorie de tehnologii emergente, folosite mai ales în medii urbane aglomerate pentru detectarea indirectă a traficului. Aceștia captează zgomotul specific generat de deplasarea vehiculelor sau vibrațiile transmise prin infrastructură, datele fiind ulterior analizate cu algoritmi specializați de recunoaștere acustică și filtrare a zgomotului de fond.

Tehnologia pe bază de ultrasunete completează detecția acustică, fiind folosită în special pentru măsurători de proximitate și identificarea volumului de trafic în tuneluri, parcuri subterane și zone cu vizibilitate limitată.

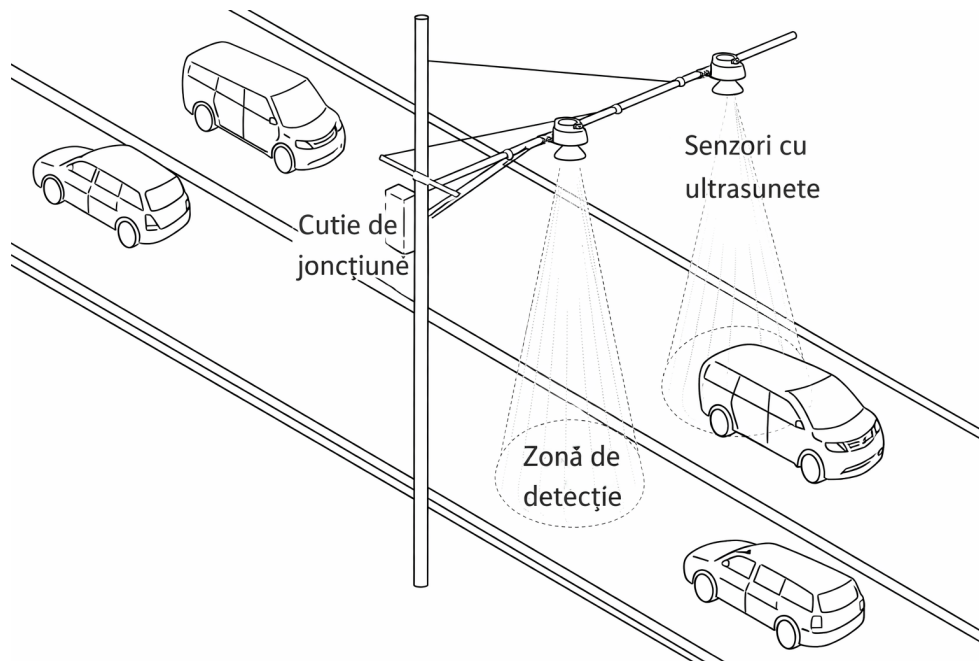


Figura 2.28. Senzori cu ultrasunete

În același registru se înscriu și **camerele cu imagistică termică**, care completează detectoarele video tradiționale în condiții meteorologice nefavorabile sau iluminare deficitară. Camerele termice detectează radiația infraroșie emisă de vehicule și pietoni, ceea ce permite monitorizarea precisă pe timp de noapte, în ceață densă sau în condiții de vizibilitate redusă, unde camerele convenționale pierd din acuratețe.

Sistemele moderne combină imagistica termică cu procesarea AI, permițând nu doar detecția, ci și clasificarea tipurilor de vehicule și recunoașterea tiparelor de deplasare. Acest lucru optimizează funcționarea intersecțiilor semaforizate adaptiv și contribuie la creșterea nivelului de siguranță.



Figura 2.29. Cameră cu imagistică termică

Un alt trend semnificativ în domeniul monitorizării traficului rutier este reprezentat de utilizarea datelor de poziționare **GNSS** (*Global Navigation Satellite Systems*) avansate, colectate de la vehiculele aflate în mișcare. Aceste date provin în principal din două surse majore: rețelele de flotă comercială, precum camioane de transport marfă, vehicule de livrare rapidă, autobuze de transport public, și aplicațiile mobile utilizate la scară largă de conducători auto sau pasageri. Echipamentele moderne de localizare, integrate direct în unitățile de bord (OBU - *On-Board Unit*) sau în terminalele mobile, transmit date de poziționare în timp real, cu o frecvență ridicată și o precizie suficientă pentru analiză la nivel de bandă de circulație.

Monitorizarea bazată pe GNSS permite colectarea unei cantități mari de date, acoperind simultan segmente rutiere extinse, indiferent de condițiile meteo sau de infrastructura locală. Astfel, fluxurile de trafic pot fi observate nu doar pe arterele principale, ci și pe drumurile secundare sau în zone periurbane, unde alte tehnologii fixe (precum senzorii inductivi, radarul sau camerele video) sunt dificil de instalat sau justificat economic. Prin procesarea datelor brute de poziționare, pot fi determinate vitezele medii, timpii de parcurs, traseele preferate, dar și anomalii de trafic cauzate de lucrări, accidente sau alte evenimente neprevăzute.

Integrarea datelor GNSS cu sistemele fixe de detecție, cum ar fi senzorii inductivi, plăcile de presiune, echipamentele radar și LiDAR sau camerele video, conduce la o abordare multi-senzorială integrată, capabilă să ofere o imagine aproape în timp real a mobilității urbane și interurbane. Această fuziune de date sporește gradul de acuratețe în estimarea timpurilor de deplasare și în identificarea zonelor de congestie, reducând erorile asociate metodelor tradiționale de observare punctuală. De asemenea, modelele predictive obținute astfel pot fi utilizate pentru ajustarea semaforizării, pentru managementul dinamic al benzilor de circulație și pentru informarea în timp real a utilizatorilor prin aplicații de navigație.

În plus, datele GNSS, în combinație cu algoritmi avansați de *machine learning*, facilitează identificarea unor tipare comportamentale recurente ale utilizatorilor rețelei rutiere: orele de vârf, viteza de reacție la incidente, rutele alternative preferate sau impactul sezonier al factorilor de mediu asupra traficului. Aceste informații sunt esențiale în planificarea investițiilor în infrastructură, dimensionarea corectă a capacităților de drum și optimizarea serviciilor de transport public și logistic.

Un alt avantaj major al monitorizării prin GNSS este caracterul anonim al datelor, atunci când acestea sunt colectate și procesate în conformitate cu reglementările privind protecția datelor cu caracter personal. Platformele moderne de analiză agregă pozițiile vehiculelor în fluxuri statistice, eliminând datele individuale sensibile, dar păstrând utilitatea practică pentru autorități, operatori de transport și furnizori de servicii *smart city*.

Nu în ultimul rând, tehnologiile GNSS au o flexibilitate operațională mare, permițând monitorizarea permanentă, indiferent de extinderea rețelei rutiere sau de modificările de infrastructură.

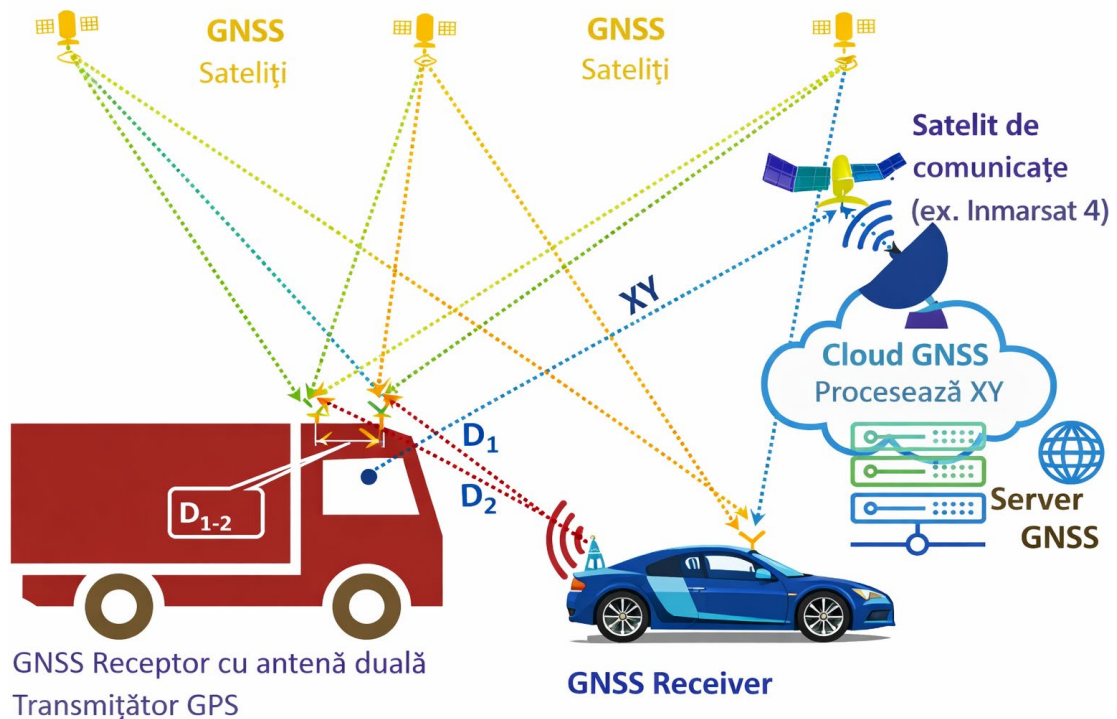


Figura 2.30. Mod de funcționare al sistemului GNSS

Nu în ultimul rând, monitorizarea traficului prin analiza datelor **big data și rețelele de comunicații mobile** (GSM/4G/5G) permite corelarea datelor statice cu fluxuri dinamice de informații provenite de la milioane de utilizatori ai rețelelor mobile. Această abordare este utilizată în special pentru anchetele origine-destinație, analiza rutelor preferențiale și estimarea timpilor reali de deplasare.

Integrarea acestor tehnologii emergente în platformele inteligente de management al traficului rutier conduce la dezvoltarea unor ecosisteme digitale interconectate, în care senzorii fizici, vehiculele conectate și utilizatorii rețelei rutiere participă activ la generarea și schimbul de informații. Această paradigmă transformă modul în care autoritățile gestionează traficul urban, trecând de la un model reactiv la unul proactiv și predictiv.

Prin combinarea acestor soluții avansate cu infrastructura de detecție existentă, se obține o acuratețe sporită în colectarea datelor, se optimizează fluxurile de circulație și se reduc timpii de răspuns în situații de urgență sau incidente neprevăzute. Astfel, tehnologiile emergente nu doar completează arsenalul ingineriei de trafic, ci îl redefinesc, contribuind semnificativ la tranziția către mobilitatea urbană sustenabilă și la crearea orașelor inteligente ale viitorului.

Adoptarea acestor soluții avansate nu elimină rolul tehnologiilor tradiționale, ci le completează prin redundanță, acuratețe sporită. Abordarea multisenzorială, bazată pe interoperabilitate, asigură o monitorizare robustă, fiabilă și adaptabilă la specificul local al rețelei rutiere.

2.2.8. Integrarea senzorilor avansați și a platformelor *Smart City* în managementul traficului

Evoluția sistemelor de monitorizare și management al traficului rutier este strâns legată de dezvoltarea infrastructurilor urbane inteligente și de adoptarea unor tehnologii avansate de achiziție, procesare și integrare a datelor. În acest context, soluțiile moderne nu mai funcționează ca sisteme izolate, ci sunt concepute ca componente ale unor ecosisteme digitale complexe, specifice conceptului de *Smart City*. Integrarea senzorilor avansați, incluzând senzori optici specializați, noduri inteligente și dispozitive IoT, cu platforme urbane centralizate permite colectarea și corelarea în timp real a unor volume mari de date referitoare la fluxurile de trafic, condițiile de mediu și starea infrastructurii rutiere.

Această abordare integrată facilitează trecerea de la monitorizarea pasivă a traficului la un management activ și adaptiv, bazat pe analiza contextuală a datelor și pe suport decizional informat. Platformele *Smart City* au un rol în agregarea informațiilor provenite din surse eterogene, asigurând interoperabilitatea dintre sistemele de trafic, cele de mediu, siguranță publică și mobilitate urbană. Prin intermediul acestor platforme, datele furnizate de senzorii avansați pot fi utilizate nu doar pentru optimizarea fluxurilor rutiere, ci și pentru fundamentarea politicilor urbane și îmbunătățirea calității vieții în mediul urban.

Camere hiperspectrale pentru analiza avansată a mediului rutier

Camerele hiperspectrale reprezintă o tehnologie avansată de achiziție a imaginilor, utilizată tot mai frecvent în aplicații de monitorizare complexă a mediului, inclusiv în domeniul transporturilor și al infrastructurii rutiere inteligente. Spre deosebire de sistemele optice convenționale, aceste camere permit captarea și analiza informației spectrale detaliate, oferind o perspectivă mult mai profundă asupra proprietăților fizice și chimice ale obiectelor și suprafețelor observate.

Principiul imagisticii hiperspectrale se bazează pe captarea radiației electromagnetice reflectate sau emise de obiecte într-un număr foarte mare de benzi spectrale înguste și continue, distribuite de regulă în domeniul vizibil, infraroșu apropiat și, în unele aplicații, infraroșu de undă scurtă. Fiecare pixel al imaginii nu conține doar informație spațială, ci și un vector spectral

complet, cunoscut sub denumirea de semnătură spectrală. Această semnătură este specifică materialului observat și permite diferențierea precisă între obiecte care pot avea o aparență similară în imaginile convenționale.

Camerele video clasice captează informația în doar trei benzi largi (roșu, verde și albastru), oferind o reprezentare vizuală apropiată de percepția umană, dar limitată din punct de vedere analitic. Camerele multispectrale extind această abordare prin utilizarea unui număr redus de benzi suplimentare, de obicei între 4 și 10, ceea ce permite o analiză mai bună a anumitor proprietăți ale mediului. În schimb, camerele hiperspectrale utilizează zeci sau chiar sute de benzi spectrale înguste, permițând identificarea detaliată a materialelor și a variațiilor subtile de compoziție, imposibil de detectat prin tehnologiile RGB (roșu, verde și albastru) sau multispectrale.

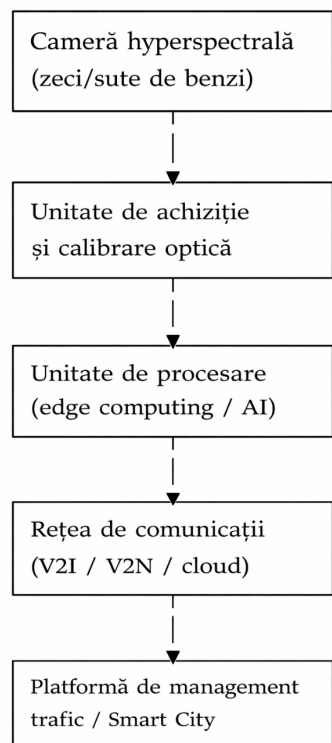


Figura 2.31. Schiță conceptuală - structură fizică a unui sistem rutier hiperspectral

În contextul infrastructurii rutiere inteligente, camerele hiperspectrale oferă un potențial semnificativ în identificarea tipurilor de vehicule. Analiza semnăturilor spectrale permite diferențierea materialelor caroseriei, a tipurilor de anvelope sau a încărcăturilor, contribuind la o clasificare mult mai precisă a vehiculelor decât metodele bazate exclusiv pe formă sau dimensiune.

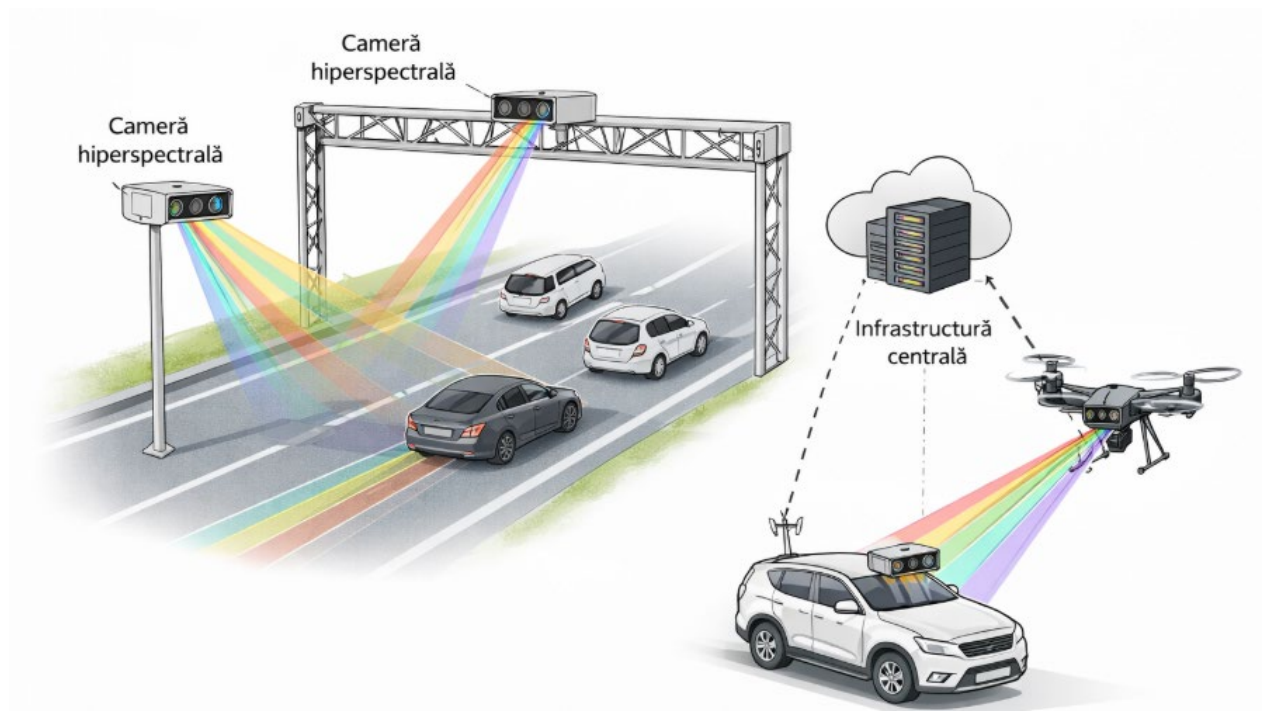


Figura 2.32. Reprezentarea vizuală a sistemului hiperspectral

Camera este montată pe un stâlp rutier, pe o structură de tip portal sau pe o platformă mobilă (vehicul sau dronă), având câmp vizual orientat către carosabil și zonele adiacente. Datele spectrale sunt prelucrate local sau transmise către infrastructura centrală pentru analiză avansată și integrare în sistemele inteligente de management al traficului.

Aceste sisteme sunt capabile să detecteze condițiile carosabilului, precum prezența apei, gheții, zăpezii, uleiurilor sau degradărilor structurale ale asfaltului. Variațiile spectrale ale suprafeței drumului oferă indicii clare asupra stării acestuia, permițând intervenții preventive și adaptarea dinamică a strategiilor de management al traficului.

Un alt domeniu important îl reprezintă analiza poluării și a stării infrastructurii. Camerele hiperspectrale pot identifica depuneri de particule, scurgeri de substanțe chimice sau modificări ale materialelor de construcție, facilitând monitorizarea impactului traficului asupra mediului și evaluarea durabilității infrastructurii rutiere.

Chiar dacă au numeroase avantaje, utilizarea camerelor hiperspectrale în aplicații rutiere este limitată de mai mulți factori. Costurile ridicate ale echipamentelor și ale sistemelor de calibrare reprezintă o barieră semnificativă pentru implementarea pe scară largă. În plus, volumul foarte mare de date generate necesită capacități avansate de stocare și procesare, precum și algoritmi sofisticăți de analiză spectrală și inteligență artificială. De asemenea, procesarea în timp real rămâne o provocare majoră, mai ales în condiții de trafic intens și medii dinamice, unde latența sistemului este nefavorabilă.

Senzori inteligenți și infrastructură rutieră bazată pe *Internet of Things* (IoT)

Senzorii inteligenți și infrastructura rutieră bazată pe IoT au rolul de a colecta, prelucra și transmite date locale din mediul rutier către platforme centralizate sau distribuite de analiză. Aceste soluții extind paradigma tradițională a monitorizării traficului, bazată pe senzori izolați sau sisteme punctuale, către o arhitectură distribuită, interconectată și scalabilă, specifică orașelor inteligente.

Din punct de vedere conceptual, un sensor inteligent face parte dintr-un nod IoT autonom, instalat în infrastructura rutieră (stâlpi, semafoare, parapete, refugii pietonale, borduri sau chiar carosabil), echipat cu unul sau mai mulți senzori, o unitate de procesare locală, un modul de comunicație și, în multe cazuri, o sursă proprie de alimentare. Acești senzori funcționează ca puncte de observare distribuite, capabile să colecteze date direct din proximitatea traficului, fără a depinde exclusiv de sisteme centralizate sau de observații indirecte.

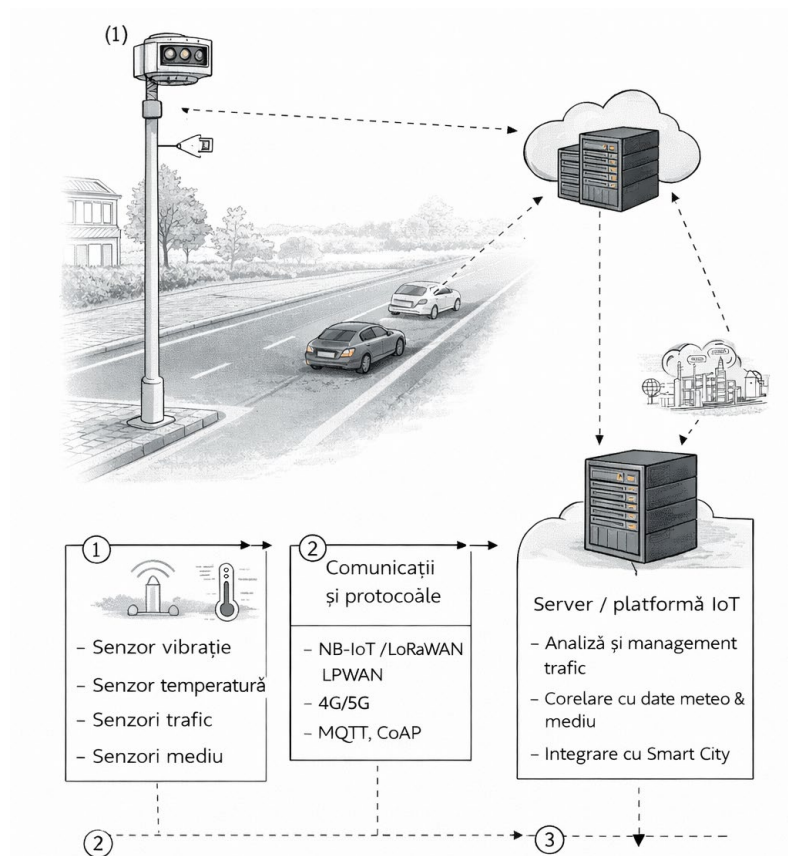


Figura 2.33. Schema explicativă a nodurilor IoT inteligente

Funcționarea nodurilor IoT se bazează pe achiziția continuă sau periodică a datelor locale, urmată de prelucrarea primară a acestora la nivelul nodului și transmiterea informațiilor relevante către infrastructura de comunicații. În funcție de arhitectura sistemului, datele pot fi

filtrate, agregate sau comprimate local (*edge computing*), reducând volumul de informații transmis și latența, sau pot fi transmise brut către platforme IoT centrale pentru analiză avansată. Această abordare permite o reacție rapidă la evenimente locale, precum variații bruște ale traficului, apariția vibrațiilor anormale sau schimbări ale condițiilor de mediu.

Rolul senzorilor și al nodurilor IoT în colectarea datelor locale este important pentru obținerea unei imagini detaliate și în timp real asupra stării infrastructurii rutiere și a fluxurilor de trafic. Spre deosebire de camerele video sau radarele punctuale, nodurile IoT pot fi instalate în număr mare, la costuri relativ reduse, acoperind zone extinse și furnizând date granulare despre trafic, condițiile carosabilului și mediul înconjurător. Prin densitatea lor ridicată, aceste noduri permit identificarea micro-șabloanelor (*traffic patterns*) de trafic și a problemelor locale care ar putea fi ignorate de sistemele clasice.

Nodurile IoT pot integra o varietate de senzori, în funcție de scopul aplicației. Senzorii de vibrație și accelerație sunt utilizați pentru detectarea trecerii vehiculelor, estimarea intensității traficului, identificarea vehiculelor grele sau monitorizarea stării structurale a drumurilor și podurilor. Senzorii de temperatură permit evaluarea condițiilor termice ale carosabilului, fiind relevanți pentru detectarea riscului de îngheț sau degradare a asfaltului. Senzorii de trafic pot include bucle inductive miniaturizate, senzori magnetici sau senzori acustici, care contribuie la estimarea volumului și vitezei vehiculelor. De asemenea, senzorii de mediu, precum cei de calitate a aerului, umiditate, zgomot sau particule fine, permit corelarea traficului cu impactul asupra mediului urban și asupra sănătății populației.

Comunicarea dintre senzorii inteligenți și infrastructura centrală se realizează prin tehnologii și protocoale specifice IoT, optimizate pentru consum redus de energie și transmisii eficiente pe distanțe variabile. În zonele urbane dense sau pentru aplicații cu cerințe de latență scăzută, pot fi utilizate rețele celulare 4G și 5G. Aceste mecanisme de comunicație asigură integrarea nodurilor IoT în ecosisteme mai largi de tip *Smart City*.

Contribuția acestui sistem la monitorizarea distribuită a traficului este semnificativă. Prin distribuirea senzorilor pe întreaga rețea rutieră, sistemul devine mai flexibil și mai ușor de extins. Adăugarea de noi noduri nu necesită reconfigurări majore ale infrastructurii existente, iar datele colectate pot fi agregate și corelate pentru a obține indicatori de performanță ai traficului la nivel local, zonal sau urban.

Cu toate acestea, senzorii și infrastructura IoT rutieră prezintă și limitări semnificative, care împiedică implementarea lor pe scară largă. Una dintre principalele limitări este legată de costurile cumulative asociate cu instalarea, întreținerea și gestionarea unui număr mare de noduri, în special în mediile urbane extinse. De asemenea, autonomia energetică rămâne o

provocare, întrucât multe noduri depind de baterii sau de surse alternative de energie, ceea ce implică intervenții periodice pentru mentenanță.

O altă limitare importantă este legată de fiabilitatea comunicațiilor și de securitatea datelor. Rețelele IoT pot fi vulnerabile la interferențe, pierderi de pachete sau atacuri cibernetice, ceea ce impune implementarea unor mecanisme robuste de criptare și autentificare. În plus, standardizarea insuficientă și interoperabilitatea limitată între diferite platforme și producători pot îngreuna integrarea nodurilor IoT într-un sistem unitar de management al traficului.

Nu în ultimul rând, volumul mare de date generate de rețelele dense de senzori necesită capacități avansate de procesare și analiză, precum și personal specializat pentru operarea sistemelor. Aceste constrângeri tehnice și organizaționale explică de ce, în prezent, nodurile inteligente sunt implementate preponderent în proiecte pilot sau în zone urbane bine delimitate, urmând ca adoptarea lor pe scară largă să fie condiționată de maturizarea tehnologică și de optimizarea costurilor.

Integrarea sistemelor de monitorizare a traficului în platforme *Smart City*

Dezvoltarea orașelor inteligente presupune trecerea de la sisteme izolate de monitorizare către platforme urbane integrate, capabile să coreleze date provenite din multiple domenii funcționale. În acest context, sistemele de monitorizare a traficului rutier reprezintă un pilon esențial al ecosistemului *Smart City*, întrucât mobilitatea urbană influențează direct eficiența economică, calitatea mediului și siguranța cetățenilor. Integrarea acestora într-o platformă urbană unificată permite depășirea limitărilor sistemelor tradiționale, care operează independent și furnizează informații fragmentate, greu de valorificat la nivel strategic.

O platformă urbană integrată este concepută ca o infrastructură digitală centralizată capabilă să colecteze, să stocheze și să proceseze date provenite din surse eterogene, precum senzori rutieri, camere video, noduri IoT, sisteme de transport public, rețele de mediu și infrastructuri de siguranță urbană. Această platformă funcționează ca un strat intermediar între infrastructura fizică a orașului și aplicațiile de management urban, asigurând normalizarea datelor, interoperabilitatea între sisteme și accesul controlat al factorilor de decizie la informații relevante în timp real sau în regim istoric.

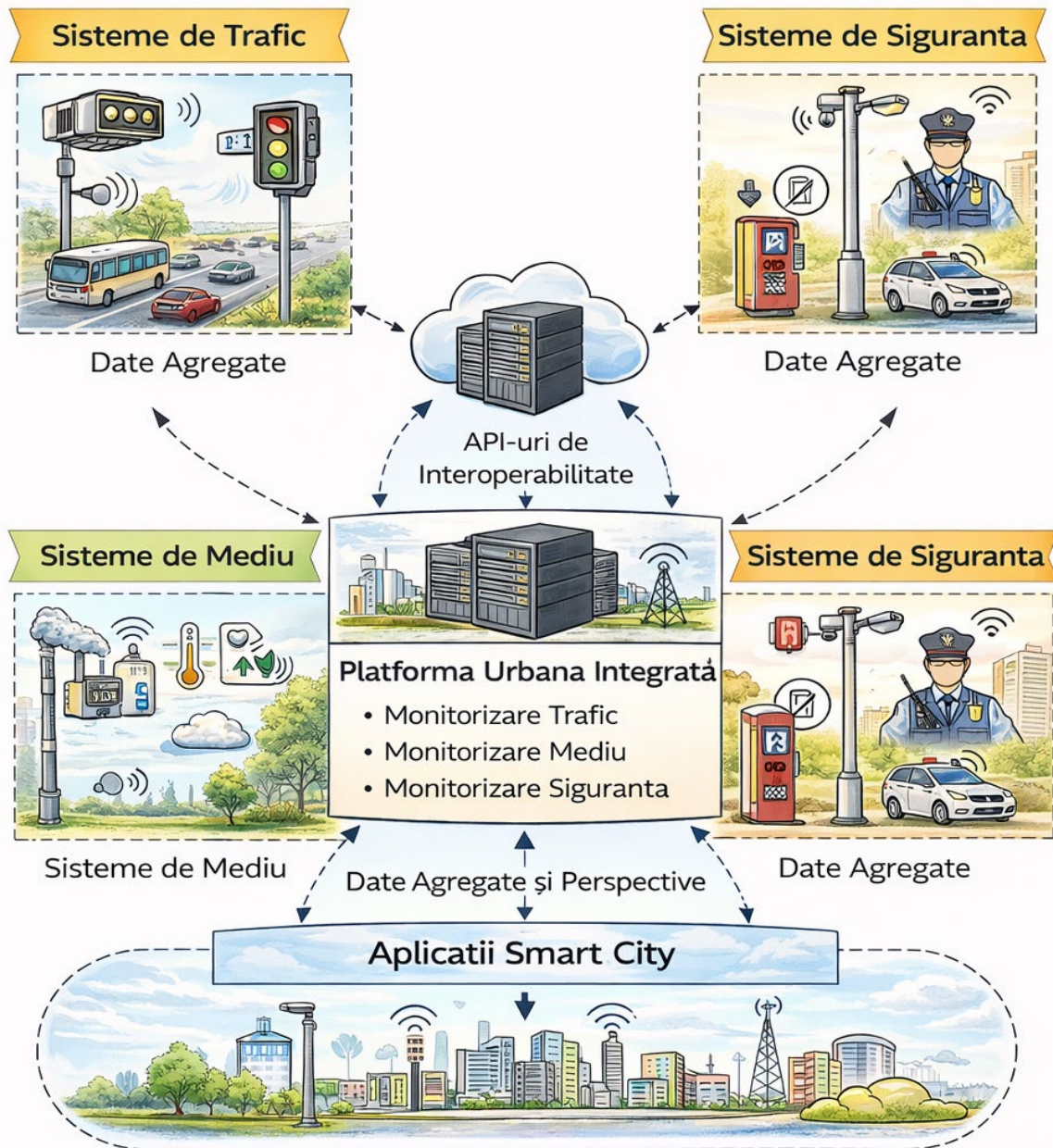


Figura 2.34. Aplicații *Smart City*

Un element important al acestui proces îl constituie interoperabilitatea dintre sistemele de trafic, mediu și siguranță publică. API (*Application Programming Interface*) este o interfață software care definește regulile, formatele și protocoalele prin care un sistem informatic poate oferi sau solicita date de la un alt sistem.

Într-un oraș inteligent, datele privind fluxurile de vehicule, nivelurile de poluare, condițiile meteorologice sau incidentele rutiere nu sunt analizate izolat, ci corelate pentru a oferi o imagine contextuală completă. De exemplu, informațiile furnizate de senzorii de trafic pot fi corelate cu datele de calitate a aerului pentru identificarea zonelor cu emisii ridicate cauzate de

congestie, sau cu datele provenite din sistemele de siguranță pentru detectarea timpurie a situațiilor cu risc crescut de accidente. Standardizarea interfețelor de comunicare, utilizarea API-urilor deschise și adoptarea unor modele comune de date sunt esențiale pentru asigurarea acestei interoperabilități funcționale.

Prin agregarea și analiza volumelor mari de date colectate, platformele *Smart City* permit managementul avansat al mobilității urbane. Autoritățile pot monitoriza în timp real starea rețelei rutiere, pot adapta semaforizarea în funcție de cererea de trafic, pot gestiona mai eficient transportul public și pot implementa politici de mobilitate durabilă, precum prioritizarea transportului nemotorizat sau restricționarea accesului în zonele congestionate. În plus, analiza datelor istorice oferă suport pentru planificarea infrastructurii, optimizarea traseelor și evaluarea impactului măsurilor adoptate asupra comportamentului participanților la trafic.

La nivel strategic, utilizarea datelor agregate în cadrul platformelor urbane integrate contribuie semnificativ la optimizarea deciziilor urbane. Modelele predictive bazate pe date reale permit simularea diferitelor scenarii de dezvoltare, evaluarea cost-beneficiu a investițiilor în infrastructură și fundamentarea politicilor publice pe criterii obiective. Astfel, deciziile privind extinderea rețelei rutiere, implementarea zonelor cu trafic restricționat sau dezvoltarea transportului public sunt susținute de analize cantitative, reducând incertitudinea și sporind eficiența administrativă.

Astfel că, integrarea sistemelor de monitorizare a traficului în platforme *Smart City* transformă datele brute colectate la nivel local în informație strategică, cu impact direct asupra mobilității, siguranței și sustenabilității urbane. Această abordare reprezintă un pas esențial către orașe mai eficiente, mai sigure și mai adaptate nevoilor reale ale comunităților urbane moderne.

3. Metode statistice aplicate în analiza traficului rutier

În contextul actual al dezvoltării accelerate a infrastructurii rutiere și al creșterii complexității rețelelor de transport, analiza statistică aplicată datelor de trafic a devenit o componentă de primă linie a cercetării ingineresti și a managementului inteligent al mobilității. Traficul rutier modern generează un volum masiv de date, provenite atât din surse tradiționale, observații manuale, măsurători pe teren, cât și din sisteme automate integrate, cum sunt senzorii inductivi, detectoarele radar, video detecția și platformele GNSS.

Pentru ca aceste date să poată fi transformate în informații cu valoare practică și strategică, este necesară aplicarea unor metode statistice, care să asigure obținerea unor valori credibile, reproductibile și relevante din punct de vedere operațional. Numai astfel pot fi generate evaluări de perspectivă asupra dinamicii fluxurilor de trafic, pot fi identificate tendințele de evoluție și pot fi anticipate zonele de risc, blocajele sau necesitățile de optimizare a capacității rutiere.

Datele de trafic trebuie să fie supuse unei verificări stricte, tocmai pentru a garanta caracterul de date de încredere, fără de care planificarea și dimensionarea soluțiilor tehnice ar fi compromise. Fiabilitatea măsurătorilor și consistența analizelor statistice condiționează direct calitatea deciziilor de investiții, fundamentarea studiilor de fezabilitate și de trafic, calculul nivelului de serviciu și dimensionarea viitoarelor extensii de infrastructură.

În acest sens, indicatorii statistici fundamentali permit sintetizarea și interpretarea rapidă a seturilor mari de date, oferind o imagine clară asupra comportamentului general al fluxurilor rutiere. Măsurile de tendință centrală stabilesc valorile reprezentative ale parametrilor de trafic, cum ar fi intensitatea medie orară sau viteza medie de circulație, care sunt necesare pentru orice analiză comparativă.

În paralel, măsurile de dispersie și variabilitate indică gradul de stabilitate sau fluctuațiile fenomenelor rutiere, evidențiind devierile față de valorile medii și permițând identificarea comportamentului neomogen, atât pe intervale de timp scurte, cât și pe serii lungi de date. Mai departe, indicatorii statistici specifici contribuie la interpretare, oferind informații despre distribuția asimetrică, gradul de uniformitate sau corelațiile între variabile precum flux, densitate și viteză.

În completare, prin analiza statistică se abordează gruparea datelor statistice și construirea frecvențelor caracteristice, etape fundamentale pentru descrierea și modelarea fenomenelor complexe din trafic. În mod particular, distribuțiile de probabilitate pentru variabile discrete și modelele de distribuție pentru variabile continue sunt utile pentru simularea și prognoza fluxurilor, optimizarea capacității drumurilor și evaluarea riscurilor operaționale.

Prin aplicarea integrată a acestor metode, se obțin instrumente de analiză predictivă care sprijină dezvoltarea unor politici publice coerente. Astfel, întregul ansamblu metodologic descris în acest capitol devine un punct de pornire pentru orice demers profesional în ingineria traficului rutier.

3.1. Indicatori statistici fundamentali pentru evaluarea datelor de trafic

Indicatorii statistici fundamentali permit cuantificarea caracteristicilor datelor de trafic colectate prin observație directă sau prin tehnologii automate. Aceștia descriu distribuția valorilor observate, tendința centrală, gradul de dispersie și eventualele abateri semnificative de la un model idealizat.

3.1.1. Măsuri de tendință centrală în analiza distribuției datelor

În analiza statistică a datelor de trafic rutier, măsurile de tendință centrală reprezintă un instrument esențial pentru caracterizarea valorilor reprezentative ale unui set de observații. Aceste măsuri permit sintetizarea informațiilor obținute prin sondaj și oferă o imagine clară asupra valorii tipice în jurul căreia se grupează majoritatea observațiilor.

Media aritmetică de sondaj este, în mod uzual, cea mai frecvent utilizată măsură de tendință centrală. Ea se calculează ca suma tuturor valorilor observate împărțită la numărul total de observații. În trafic, media aritmetică exprimă valori precum intensitatea medie a fluxului vehicular (vehicule/oră), viteza medie de deplasare sau timpul mediu de staționare la intersecții. Deși simplă, media aritmetică este sensibilă la valori extreme, motiv pentru care interpretarea sa trebuie completată cu măsuri de dispersie.

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

unde: n – numărul de date din șir

x_i – valoare a șirului de date 1...n

Exemplu aplicativ: Pe un drum urban, s-au numărat vehiculele care trec printr-o intersecție într-o serie de intervale de 5 minute, cu următoarele valori:

80, 95, 85, 100, 90 vehicule.

Calcul: $m = \frac{80+95+85+100+90}{5} = \frac{450}{5} = 90 \text{ veh}/5 \text{ min}$

Interpretare: Intensitatea medie a fluxului este 90 veh/5 min, ceea ce înseamnă 1080 vehicule/oră pe acea intersecție. Această valoare se folosește pentru dimensionarea ciclurilor de semaforizare sau evaluarea capacității intersecției.

Media geometrică de sondaj este utilizată în situații în care datele au o distribuție multiplicativă sau variază pe scară logaritmică. În studiile de trafic, media geometrică poate fi utilă pentru analiza ratelor de creștere a fluxului pe intervale succesive, compararea coeficienților de variație sau evaluarea unor indicatori ponderați, unde variațiile relative sunt mai importante decât valorile absolute.

Ecuția utilizată pentru a obține un factor mediu de creștere este:

$$g = (\prod_{i=1}^n x_i)^{\frac{1}{n}} \quad (3.2)$$

Exemplu aplicativ: Un punct de măsurare a fluxului rutier înregistrează numărul mediu de vehicule/oră pe parcursul a 4 ore succesive: 500, 550, 600, 650 vehicule/oră.

Calcul: $g = (500 \cdot 550 \cdot 600 \cdot 650)^{\frac{1}{4}} = \sqrt[4]{500 \cdot 550 \cdot 600 \cdot 650} = 572.4 \text{ veh/h}$

Ecuția utilizată pentru a obține rata medie de creștere (%) este:

$$g = (\prod_{i=1}^n x_i)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (3.3)$$

Exemplu aplicativ: Pe un drum se analizează rata zilnică de creștere a numărului de vehicule pe o săptămână: 5%, 4%, 6%, 5%, 5%, 4%, 5%.

Calcul: $g = (1.05 \cdot 1.04 \cdot 1.06 \cdot 1.05 \cdot 1.05 \cdot 1.04 \cdot 1.05)^{\frac{1}{7}} - 1$
 $g = 1.051 - 1 = 5.1\%$

Interpretare: Rata medie geometrică de creștere este 5.1%, utilă pentru proiecții de trafic și planificarea extinderii capacității drumului.

Regula practică de calcul a mediei geometrice este să nu se scadă 1 atunci când se calculează volume, debite, numere, iar atunci când este vorba despre procente de variație sau rate de creștere, se scade 1.

Media armonică de sondaj este adecvată mai ales atunci când valorile analizate reprezintă rapoarte sau viteze. În cazul vitezei medii pe o secțiune de drum, media armonică oferă o evaluare mai realistă, reflectând corect impactul vehiculelor mai lente, care pot influența semnificativ fluxul general. Se calculează ca raportul dintre numărul de observații și suma inverselor valorilor observate.

$$h = \frac{n}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} \quad (3.4)$$

Exemplu aplicativ: Se măsoară viteza a 5 vehicule pe un tronson: 60, 50, 55, 70, 40 km/h.

$$\text{Calcul: } h = \frac{5}{\frac{1}{60} + \frac{1}{50} + \frac{1}{55} + \frac{1}{70} + \frac{1}{40}} = \frac{5}{0.0167 + 0.02 + 0.0182 + 0.0143 + 0.025} = \frac{5}{0.0942} = 53.05 \text{ km/h}$$

Interpretare: Viteza medie armonică reală este 53.05 km/h, mai mică decât media aritmetică (55 km/h), subliniind efectul vehiculelor lente asupra fluxului. Este folosită la estimarea timpilor reali de deplasare.

Mediana de sondaj reprezintă valoarea care împarte distribuția în două jumătăți egale, astfel încât 50% dintre observații se află sub aceasta și 50% deasupra (50% dintre observații sunt mai mici sau egale cu mediana, 50% sunt mai mari sau egale cu mediana). Mediana este mai solidă decât media aritmetică, fiind mai puțin influențată de valori extreme. În trafic, poate fi folosită pentru a evalua viteza mediană de deplasare pe un tronson, timpul median de așteptare sau distanța mediană între vehicule. Aceasta este un indicator al șirului ordonat de valori și se determină cu relații distincte, în funcție de paritatea sau imparitatea șirului.

Pentru n – număr impar:

$$M_e = x_{\frac{n+1}{2}} \quad (3.5)$$

Exemplu aplicativ: Pe un tronson de drum cu 7 benzi de circulație s-au măsurat următoarele numere de vehicule pe oră: 380, 420, 400, 450, 410, 440, 430.

Primul pas: Ordonarea crescătoare a șirului de valori: 380, 400, 410, 420, 430, 440, 450

Pasul 2: Aplicarea formulei 3.5: $n = 7 \rightarrow k = (7+1)/2 = 4 \rightarrow$ al 4-lea element = 420.

Deci $M_e = 420$ veh/h.

Interpretare: În acest caz, mediana arată că, pentru cele 7 intervale orare analizate (de exemplu, 7 ore consecutive sau 7 zile diferite), jumătate dintre intervale au înregistrat un flux de vehicule egal sau mai mic decât 420 vehicule/oră, iar cealaltă jumătate au avut un flux egal sau mai mare de 420 vehicule/oră.

Practic, valoarea mediană oferă o imagine stabilă asupra fluxului orar tipic, indiferent dacă au existat valori mai scăzute (380) sau mai ridicate (450) care ar fi putut influența puternic media aritmetică. Astfel, pentru planificare (ex. dimensionarea unei benzi, estimarea capacității unui nod rutier), mediana reflectă mai bine situația curentă decât ar face-o media dacă datele ar fi dispersate.

Pentru n – număr par:

$$M_e = \frac{x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad (3.6)$$

Exemplu aplicativ: Pe un tronson de drum cu 8 benzi de circulație s-au măsurat următoarele numere de vehicule pe oră: 380, 420, 400, 450, 410, 440, 430, 460.

Primul pas: Ordonarea crescătoare a șirului de valori: 380, 400, 410, 420, 430, 440, 450, 460

Pasul 2: Aplicarea formulei 3.6: $n = 8 \rightarrow k = 8/2 = 4 \rightarrow$ valorile din mijloc: al 4-lea și al 5-lea. Deci $M_e = 425$ veh/h.

Interpretare: Pentru cele 8 intervale orare, valoarea mediană de 425 vehicule/oră indică pragul central, peste care s-au situat jumătate dintre intervale și sub care s-au situat cealaltă jumătate.

Practic, acest aspect arată că, într-o zi obișnuită, fluxul tipic pe acest tronson de drum se stabilizează în jurul valorii de 425 vehicule/oră. Astfel, planificatorii de trafic sau inginerii pot lua această valoare ca referință robustă când dimensionează intersecțiile, stabilesc timpi de semaforizare sau estimează capacitatea de preluare în orele de vârf.

Modul de sondaj este valoarea care apare cel mai frecvent într-un set de date. În trafic, modul poate evidenția, de exemplu, clasa de viteză cea mai comună pe un anumit tronson (ex. viteze predominante între 50–60 km/h) sau perioada orară cu cea mai mare frecvență de vehicule. Acesta exprimă legătura statistică între media aritmetică și mediană prin ecuația:

$$M_o = m + 3 \cdot (M_e - m) \quad (3.7)$$

Exemplu aplicativ: Pe un tronson de drum se măsoară numărul de vehicule care trec într-o oră, la fiecare 10 minute. Reies următoarele date:

Tabelul 3.1. Valori de trafic pentru calculul modului estimativ de sondaj

Interval (minute)	Nr. vehicule
0–10	60
10–20	75
20–30	90
30–40	85
40–50	70
50–60	65

Pasul 1: Se calculează media aritmetică:

$$m = (60+75+90+85+70+65)/6 = 74.17 \text{ veh}/10 \text{ min}$$

Pasul 2: Se calculează mediana pentru șirul par de valori cu ecuația 3.6:

$$M_e = (70+75)/2 = 72.5 \text{ veh}/10 \text{ min.}$$

Pasul 3: Se calculează modul cu relația 3.7: $M_o = 74.17 + 3(72.5 - 74.17) = 74.17 - 5.01 = 69.16$ veh/10 min

Interpretare: Modul estimativ arată că, statistic, cel mai frecvent volum de trafic pe un interval de 10 minute, pe baza structurii distribuției (nu doar pe valori brute), tinde să fie în jur de 69 vehicule. Valoarea aceasta indică o zonă de funcționare obișnuită, adică majoritatea intervalelor se vor concentra în jurul acestui flux.

În exemplul de față, un flux de ~ 69 vehicule/10 min = ~ 414 vehicule/oră indică un nivel moderat, care poate fi ușor gestionat de un semafor cu ciclu normal, fără măsuri speciale de degajare a intersecției.

Astfel că, modul estimativ arată unde este „centrul de greutate” operațional al traficului, deci se folosește ca reper pentru dimensionări optime, dar nu pentru scenariile de vârf (acolo se aplică valori maxime reale).

Valoarea centrală este un termen mai general care desemnează orice măsură de poziție centrală utilizată ca referință pentru analiza distribuției. În practica statistică, alegerea valorii centrale potrivite se face în funcție de forma distribuției, de natura datelor și de obiectivul analizei. În contextul traficului rutier, combinația mai multor măsuri, media, mediana și modul, oferă o imagine mai completă asupra caracteristicilor fluxului de vehicule.

Practic, valoarea centrală împarte șirul de date în două zone egale, însă în care frecvența de apariție a valorilor nu este aceeași.

$$x_c = \frac{x_{max} + x_{min}}{2} \quad (3.8)$$

Exemplu aplicativ: Pe un segment de drum urban, s-au măsurat volumele de trafic (vehicule/10 min) în 7 intervale succesive, cu următoarele valori: 62, 80, 85, 90, 96, 68, 74

Pasul 1: Se identifică valorile extreme (vizual, dacă șirul are puține valori sau prin ordonare, dacă șirul are mai multe valori): $x_{min} = 62$ veh/10 min; $x_{max} = 96$ veh/10 min

Pasul 2: Se aplică formula 3.8: $x_c = (62 + 96) / 2 = 79$ veh/10 min

Interpretare: Valoarea centrală arată punctul mijlociu între extreme, fără a lua în calcul frecvența fiecărei valori.

În acest exemplu, deși traficul a variat de la 62 la 96 vehicule/10 min, valoarea 79 veh/10 min indică un reper geometric între minim și maxim. Este folosită pentru o estimare rapidă a unui interval mediu de referință, util atunci când nu ai o distribuție completă sau când vrei o primă aproximare a nivelului de trafic.

Spre deosebire de medie, valoarea centrală nu ține cont de forma distribuției. Dacă valorile extreme sunt izolate (ex. un vârf de 96 în mod excepțional), valoarea centrală poate supraestima nivelul real.

3.1.2. Măsuri de dispersie și variabilitate a datelor statistice

Analiza statistică a unui șir de date nu se poate limita doar la determinarea indicatorilor de tendință centrală (cum ar fi media aritmetică), ci trebuie să includă și evaluarea gradului de răspândire a valorilor în jurul acestor tendințe. Măsurile de dispersie și variabilitate cuantifică extinderea, omogenitatea sau eterogenitatea datelor, oferind informații pentru interpretarea riguroasă a fenomenelor studiate.

Dispersia și variabilitatea permit evaluarea stabilității unui fenomen și estimarea riscului de abatere față de valorile medii. În ingineria transporturilor și în studiile de trafic, aceste măsuri sunt vitale pentru a caracteriza fluctuațiile fluxurilor de vehicule, pentru a proiecta capacități adecvate ale infrastructurii și pentru a fundamenta măsuri eficiente de gestionare a traficului.

Principalii indicatori utilizați pentru măsurarea dispersiei sunt: dispersia (varianța), abaterea medie pătratică (ecartul standard) și amplitudinea. Fiecare dintre acești parametri oferă perspective complementare asupra gradului de variabilitate și asupra abaterilor posibile față de media aritmetică.

În continuare se prezintă relațiile de calcul pentru principalii parametri de dispersie și modalitățile lor de interpretare în analiza statistică a volumelor de trafic rutier.

Abaterea medie pătratică de sondaj, notată cu σ , reprezintă rădăcina pătrată a dispersiei și oferă o măsură sintetică a gradului de dispersie a valorilor individuale ale unui șir de date față de media aritmetică.

Abaterea medie pătratică de sondaj se determină cu relația:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2} \quad (3.9)$$

Exemplu aplicativ: Se înregistrează numărul de vehicule care trec printr-o intersecție într-un interval de 10 minute, în 5 intervale succesive: 120, 135, 128, 140, 127.

Pasul 1: Se calculează media aritmetică: $m = (120+135+128+140+127)/5 = 130$ veh/10 min

Pasul 2: Se calculează ecuația de sub radical: $\frac{1}{5} [(120 - 130)^2 + (135 - 130)^2 + (128 - 130)^2 + (140 - 130)^2 + (127 - 130)^2] = \frac{1}{5} [100 + 25 + 4 + 100 + 9] = 47.6$

Pasul 3: Se calculează $\sigma = \sqrt{47.6} = 6.9$ veh/10 min

Interpretare: Abaterea medie pătratică indică cât de mult variază fluxul vehicular față de valoarea medie. O abatere mică arată un trafic constant și previzibil, favorabil planificării semnalizării și dimensionării infrastructurii.

O abatere mare sugerează fluctuații semnificative, ceea ce poate necesita măsuri de management al traficului, precum semafoare adaptive sau benzi reversibile.

Dispersia, notată cu D , reprezintă media pătratelor abaterilor fiecărei valori față de media aritmetică.

Dispersia șirului de date se determină cu relația:

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 \quad (3.10)$$

Legătura cu abaterea medie pătratică:

Dispersia este pătratul abaterii medii pătratice: $\sigma^2 = D$.

Exemplu aplicativ: Folosind exemplul anterior:

$$D = 47.6 \text{ vehicule}^2$$

Interpretare: Deoarece dispersia se exprimă în unități pătratice (vehicule² sau km²/h², dacă se calculează viteze), este mai puțin intuitivă pentru interpretare directă. Totuși, ea este utilă în calculele ulterioare, cum ar fi estimarea erorii standard sau comparația între mai multe seturi de date.

În analiza traficului, o dispersie mare poate indica necesitatea unor studii suplimentare privind factorii care influențează variația fluxurilor: evenimente, condiții meteo, lucrări rutiere etc.

Amplitudinea este o măsură simplă a variației. Pentru volumele de trafic, ea arată domeniul de fluctuație a numărului de vehicule.

Amplitudinea șirului de date se determină cu ecuația:

$$A = x_{max} - x_{min} \quad (3.11)$$

Exemplu aplicativ: Utilizând valorile de trafic de la Abaterea medie pătratică, se identifică valoarea maximă și valoarea minimă.

$$x_{max} = 140, \quad x_{min} = 120 \implies A = 20 \text{ vehicule}$$

Interpretare: O amplitudine mică sugerează o stabilitate a fluxului, utilă pentru proiectarea capacității drumului. O amplitudine mare poate indica perioade de vârf și goluri în trafic, fiind un indicator de bază pentru dimensionarea benzii suplimentare sau stabilirea programului semaforizării.

3.1.3. Indicatori statistici specifici aplicați în studiul traficului rutier

În analiza traficului rutier, pe lângă măsurile de tendință centrală și de dispersie generală, se utilizează o serie de indicatori statistici specifici, care permit caracterizarea detaliată a structurii și comportamentului datelor observate. Acești parametri pun în evidență atât forma distribuției datelor, cât și natura fluctuațiilor în jurul valorii medii, oferind inginerilor de trafic și cercetătorilor instrumente esențiale pentru proiectarea și optimizarea rețelelor de transport.

Momentul de ordin r , coeficientul de variație, abaterea medie absolută și coeficientul de asimetrie sunt exemple de indicatori avansați care adaugă o perspectivă suplimentară asupra variabilității și formei distribuției datelor de trafic. Aceștia sunt componente de bază ale statisticii aplicate pentru înțelegerea fenomenelor de congestie, pentru evaluarea riscurilor de supraaglomerare, precum și pentru dimensionarea infrastructurii în raport cu dinamica fluxurilor de vehicule.

Prin utilizarea acestor indicatori, datele brute obținute din măsurători de trafic (cum ar fi numărul de vehicule, vitezele medii sau timpii de așteptare) pot fi transformate în informații relevante, care sprijină fundamentarea deciziilor ingineresti. În special, analiza momentelor și a coeficienților asociați permite identificarea tendințelor ascunse, detectarea abaterilor semnificative de la comportamentul așteptat și estimarea probabilității apariției unor valori extreme, cum ar fi vârfurile de sarcină în orele de trafic intens.

În practică, acești indicatori sunt utilizați pentru a cuantifica gradul de omogenitate al circulației, nivelul de regularitate al fluxurilor, gradul de simetrie sau de asimetrie al distribuțiilor de trafic, precum și pentru a compara zone, sectoare sau intervale orare din punct de vedere al performanței circulației. Astfel, indicatorii statistici specifici devin instrumente de bază pentru justificarea deciziilor de planificare, reglementare și management al traficului rutier.

În continuare sunt prezentate principalele ecuații utilizate pentru determinarea acestor parametri, împreună cu interpretările lor practice în contextul măsurătorilor de trafic.

Momentul de ordin r pentru un șir de date caracterizează distribuția datelor în raport cu originea.

Momentul de ordin r se calculează astfel:

$$M_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^r \quad (3.12)$$

Exemplu aplicativ: Se consideră un set de date care indică numărul de vehicule într-un interval: 100, 120, 110, 130, 140. Momentul de ordin 2 (moment central de ordin 2, în acest caz similar cu varianța fără media scăzută) este:

$$M_2 = \frac{1}{5}(100^2 + 120^2 + 110^2 + 130^2 + 140^2)$$

$$= \frac{1}{5}(10000 + 14400 + 12100 + 16900 + 19600) = 14200$$

Interpretare: Momentul de ordin 2 este legat de dispersie (variație), iar momentele de ordin superior (de exemplu, 3 și 4) sunt utile pentru analiza asimetriei și a gradului de aplatizare (boltire).

În traficul rutier, momentele superioare ajută la evaluarea probabilității apariției valorilor extreme (vârfuri de trafic, congestii bruște).

Coeficientul de variație al șirului de sondaj este raportul dintre abaterea medie pătratică și media aritmetică. Este exprimat, de regulă, procentual și arată variabilitatea relativă a datelor față de nivelul mediu.

$$C_v = \frac{\sigma}{m} \quad (3.13)$$

Exemplu aplicativ: Dacă fluxul mediu orar este de 500 vehicule/oră și abaterea standard este de 50 vehicule/oră, atunci: $C_v = 50/500 = 0.1 = 10\%$

Interpretare: Coeficientul de variație este util pentru a compara variabilitatea fluxurilor între sectoare de drum diferite sau între intervale orare diferite.

Un C_v mic indică stabilitate și predictibilitate, aspect favorabil pentru organizarea traficului. Un C_v mare semnalează fluctuații ridicate, necesitând măsuri de control adaptiv.

Abaterea medie absolută (A_m) măsoară mărimea medie a devierilor absolute ale valorilor față de media aritmetică, fără a lua în calcul semnul (adică se ignoră dacă valoarea este peste sau sub medie). Spre deosebire de dispersie și abaterea medie pătratică, care ridică abaterile la pătrat (amplificând deviațiile mari), abaterea medie absolută lucrează direct cu valoarea absolută

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i \cdot |x_i - m| \quad (3.14)$$

unde k_i – frecvența absolută a valorii x_i , în intervale de observare

Rolul coeficientului k_i

- k_i este frecvența absolută a valorii x_i .

- Se folosește numai atunci când datele sunt grupate pe clase sau intervale.

Exemplu aplicativ: Există o înregistrare simplă a traficului pe 6 intervale orare. Dacă sunt date individuale, atunci fiecare valoare apare o singură dată $\rightarrow k_i = 1$ pentru fiecare valoare \rightarrow formula devine:

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - m| \quad (3.15)$$

Deci pentru un șir de date brut, k_i nu este necesar, deoarece fiecare valoare apare o singură dată.

K_i intervine dacă datele sunt grupate, de exemplu:

Tabelul 3.2. Frecvențe vehicule

Număr vehicule	Frecvență (k_i)
100	3
120	2
140	1

Atunci, în loc să se scrie: 100, 100, 100, 120, 120, 140; se folosește gruparea cu k_i care scurtează calculele. Astfel că:

$k_i =$ de câte ori apare valoarea x_i (Ex. 3 sau 2 sau 1)

$n =$ suma tuturor k_i (totalul observațiilor)

Se înlocuiește în relația 3.14. astfel:

$$A_m = \frac{1}{6} (3 \cdot |100 - m| + 2 \cdot |120 - m| + 1 \cdot |140 - m|)$$

Dacă media este 113.33 veh/min, atunci $A_m = 13.33$ veh/min. Pentru acest interval, fluxul mediu este de ~ 113 vehicule/minut, cu o abatere medie absolută de ~ 13 vehicule/minut.

Aceasta indică o variabilitate moderată a fluxului, ceea ce sugerează un regim de trafic relativ uniform, cu posibile vârfuri ocazionale.

Abaterea medie absolută este foarte utilă în trafic pentru:

- a evalua omogenitatea fluxului,
- a compara sectoare de drum cu valori similare,
- a analiza eficiența măsurilor de regularizare a traficului (semafoare, benzi dedicate).

Dacă abaterea medie absolută este mică, traficul este constant și predictibil. Dacă este mare, există fluctuații majore, ceea ce poate necesita intervenții de reglare a fluxului.

Coeficientul de asimetrie caracterizează forma distribuției datelor față de media aritmetică.

$$\beta_1 = \mu_3 \cdot \frac{(\mu_3)^2}{(\sigma^2)^3} \quad (3.16)$$

$$\text{unde } \mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \cdot (x_i - m)^3 \quad (3.17)$$

μ_3 este momentul central de ordin 3.

Exemplu aplicativ: Dacă distribuția fluxurilor orare indică frecvențe mai mari la valori sub medie și apar ocazional vârfuri mari de trafic (accidente, restricții temporare), coeficientul de asimetrie va fi pozitiv.

În practică, se regăsesc următoarele valori:

- $\beta_1 > 0$: distribuție asimetrică spre dreapta (mai multe valori mici, câteva mari).
- $\beta_1 < 0$: distribuție asimetrică spre stânga (mai multe valori mari, câteva mici).
- $\beta_1 = 0$: distribuție simetrică.

Interpretare: Coeficientul de asimetrie evidențiază tendința fluxurilor de a prezenta valori extreme. De exemplu, în zone cu trafic pendular, dimineața și seara, distribuția este de regulă asimetrică pozitiv, cu vârfuri de sarcină concentrate în intervale scurte. Această informație este importantă pentru planificarea semafoarelor, limitelor de viteză și gestionarea benzilor dedicate.

3.2. Gruparea datelor statistice și frecvențe caracteristice

În analiza statistică a traficului rutier, datele brute obținute din măsurători directe (numărări manuale sau automate) sunt rareori utilizate ca atare, fiind necesară o etapă de grupare și organizare a acestora. Gruparea datelor facilitează interpretarea fenomenelor de circulație prin reducerea complexității și evidențierea regularităților ascunse în volume mari de date.

În special, atunci când se analizează serii de măsurători de volum de trafic, viteze, timpi de întârziere sau alte variabile de interes, distribuirea valorilor în clase omogene permite identificarea structurilor dominante și a abaterilor semnificative față de tendințele centrale.

Un prim pas îl constituie determinarea numărului optim de clase (k), care trebuie ales astfel încât să ofere suficientă granularitate pentru analiză, fără a fragmenta excesiv datele și a compromite relevanța statistică a fiecărei grupe.

Odată stabilit numărul de clase, se calculează amplitudinea clasei sau distanța dintre limitele claselor, notată uzual cu a . Aceasta definește intervalul numeric în care sunt repartizate valorile variabilei analizate.

Intervalul de clasă reprezintă efectiv limitele inferioară și superioară între care se încadrează observațiile. Alegerea corectă a acestor intervale asigură o distribuție coerentă și evită suprapunerile sau golurile între clase.

Pentru a caracteriza fiecare clasă, se calculează valoarea centrală a clasei, definită ca media aritmetică dintre limita inferioară și limita superioară. Aceasta se utilizează ulterior la obținerea indicatorilor globali precum media ponderată a distribuției.

Frecvența absolută reprezintă numărul de valori (vehicule, viteze etc.) care se încadrează în fiecare clasă. Ea reflectă direct distribuția fenomenului analizat pe intervalele stabilite.

Frecvența relativă exprimă ponderea fiecărei clase în totalul observațiilor, fiind calculată ca raport între frecvența absolută și numărul total de observații. Aceasta permite comparații între grupuri de date de dimensiuni diferite.

Pentru a evidenția mai clar structura procentuală, frecvența relativă poate fi transformată în frecvență relativă procentuală, oferind o imagine intuitivă a ponderii fiecărei clase.

Frecvența cumulată arată câte observații sunt situate sub o anumită limită superioară de clasă, fiind utilă în construcția curbelor de distribuție cumulative și în estimarea probabilităților asociate.

Prin aplicarea sistematică și coerentă a acestor indicatori, analiza statistică a traficului rutier devine un instrument de bază pentru diagnosticarea capacității infrastructurii, prognozarea fluxurilor și optimizarea reglementărilor de circulație.

Numărul de clase (k)

Se determină în funcție de mărimea n a eșantionului de date de trafic și reprezintă numărul în care datele se grupează. Numărul optim de clase se stabilește pe baza formulei lui Sturges sau a altor reguli empirice:

$$k = 1 + 3.322 \cdot \log_{10} n \quad (3.18)$$

unde: n este numărul total de observații.

Gruparea în clase se justifică și este concludentă numai pentru un șir de valori de peste 25 de date.

Amplitudinea clasei (a)

Amplitudinea (sau lățimea) intervalului de clasă se calculează cu relația:

$$a = \frac{x_{max} - x_{min}}{k} \quad (3.19)$$

Unde x_{max} și x_{min} sunt valorile extreme ale variabilei analizate

Intervalul de clasă

Fiecare clasă este definită printr-un interval de forma:

$$[x_{lim. inf.}, x_{lim. sup.}] \quad (3.20)$$

Valoarea centrală a clasei (x_c)

Valoarea centrală a unei clase se determină ca:

$$x_c = \frac{x_{lim.inf.} + x_{lim.sup.}}{2} \quad (3.21)$$

Frecvența absolută (f)

Reprezintă numărul de observații din fiecare clasă:

$$f_i = n_i \quad (3.22)$$

Frecvența relativă (f_r)

Reprezintă raportul dintre numărul de observații din fiecare clasă și numărul total al datelor din eșantion, n.

$$f_{ri} = \frac{f_i}{n} \quad (3.23)$$

Frecvența relativă procentuală (f_{rp})

Exprimă ponderea în procente:

$$f_{rpi} = f_{ri} \cdot 100 \quad (3.24)$$

Frecvența cumulată absolută (f_{ca})

Frecvența cumulată absolută arată numărul total de observații care se află până la limita superioară a clasei i. Se calculează prin însumarea frecvențelor absolute de la prima clasă până la clasa curentă.

$$f_{ca} = \sum_{j=1}^i n_j \quad (3.25)$$

Frecvența cumulată relativă (f_{cr})

Frecvența cumulată relativă arată proporția observațiilor care se află până la limita superioară a clasei i , raportat la total.

$$f_{cr} = \frac{f_{ca}}{n} \quad (3.26)$$

Frecvența cumulată relativă procentuală (f_{crp})

Este frecvența cumulată relativă exprimată în procente:

$$f_{crp} = f_{cr} \cdot 100 \quad (3.27)$$

3.3. Distribuții de probabilitate pentru variabile discrete în analiza traficului

În analiza statistică a traficului rutier, distribuțiile de probabilitate pentru variabile discrete ocupă un rol esențial, deoarece multe fenomene din circulația vehiculelor pot fi descrise ca procese discrete și aleatoare.

O variabilă aleatoare discretă este o mărime numerică ce poate lua doar un număr finit sau numerabil de valori distincte, fiecare cu o anumită probabilitate de apariție. Spre exemplu, numărul de vehicule care trec printr-o intersecție într-un interval fix de timp sau numărul de accidente rutiere produse într-o zi sunt variabile aleatoare discrete, deoarece valorile lor posibile sunt numere întregi (0, 1, 2, ...).

Legea de distribuție (sau funcția de probabilitate) a unei variabile discrete este funcția care asociază fiecărei valori posibile a variabilei probabilitatea de apariție a acesteia. Această funcție trebuie să îndeplinească două condiții fundamentale:

- probabilitățile sunt nenegative ($P(X=x_i) \geq 0$);
- suma tuturor probabilităților este egală cu 1 ($\sum P(X=x_i) = 1$).

În contextul traficului rutier, legea de distribuție permite modelarea incertitudinii și estimarea comportamentului probabilistic al unor fenomene precum:

- numărul de sosiri ale vehiculelor într-un interval de timp;
- frecvența defecțiunilor tehnice detectate la controalele de rutină;
- numărul de încălcări ale regulilor de circulație pe o arteră monitorizată.

Printre cele mai utilizate distribuții discrete în studiul traficului rutier se numără:

- Distribuția binomială, care modelează probabilitatea de a obține un număr fix de succese într-un număr fix de încercări independente;

- Distribuția binomială negativă, utilă pentru situațiile în care interesul este să se determine probabilitatea de a obține un număr fix de succese înainte de un anumit număr de insuccese;
- Distribuția Poisson, folosită frecvent pentru a descrie evenimente rare care apar independent într-un interval fix de timp sau spațiu (ex. sosirea vehiculelor la un punct de trecere, producerea accidentelor).

Aceste modele de distribuție oferă inginerilor și planificatorilor de trafic un cadru riguros pentru analiza, estimarea și prognoza fluxurilor de circulație, dimensionarea capacităților infrastructurii și fundamentarea măsurilor de control și siguranță.

Prin utilizarea adecvată a acestor distribuții discrete, fenomene aparent imprevizibile devin cuantificabile, facilitând luarea unor decizii raționale și optimizarea gestionării traficului rutier în condiții reale de funcționare.

Pentru a înțelege mai bine aplicabilitatea distribuțiilor discrete în traficul rutier, se analizează situații concrete care ilustrează modul în care aceste modele statistice sprijină decizia tehnică.

Distribuția binomială

Distribuția binomială modelează probabilitatea de apariție a unui număr fix de succese într-un număr fix de încercări independente, fiecare cu aceeași probabilitate de succes.

Ecuția distribuției binomiale:

$$P(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad (3.28)$$

Unde: $P(X = k)$ – probabilitatea de a obține exact k succese în n încercări

$$\binom{n}{k} \text{ - coeficientul binomial care se calculează: } \binom{n}{k} = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!} \quad (3.29)$$

p – probabilitatea de succes la o singură încercare

$1 - p$ – probabilitatea de insucces

Distribuția binomială poate fi folosită pentru a estima probabilitatea ca un anumit număr de vehicule dintr-un grup să respecte o anumită regulă (ex.: numărul de conducători auto care respectă limita de viteză pe un tronson monitorizat). Spre exemplu, într-o campanie de monitorizare a respectării limitelor de viteză pe un tronson periurban, se verifică zilnic 50 de vehicule. Conform datelor istorice, probabilitatea ca un conducător auto să respecte limita legală este de 0,85. Un inginer de trafic poate folosi distribuția binomială pentru a calcula probabilitatea ca exact 40 de vehicule din 50 să respecte limita, estimând astfel nivelul real de conformitate și dimensionând măsurile de control (radare, semnalizare).

Exemplu aplicativ: Pe un drum periurban, se monitorizează respectarea limitei de viteză de 50 km/h. Se verifică 50 de vehicule. Probabilitatea ca un conducător auto să respecte limita de viteză este $p = 0,85$. Se cere probabilitatea ca exact 40 vehicule din 50 să respecte limita legală.

Date de intrare:

- $n = 50$
- $k = 40$
- $p = 0,85$
- $q = 1 - p = 0,15$

Se menționează că, în distribuția binomială, p reprezintă probabilitatea de succes la o singură încercare și nu se presupune la întâmplare. El se estimează pe baza datelor istorice (ex. rapoarte din lunile anterioare care arată că, din 1000 de vehicule verificate, 850 respectă limita de viteză $\rightarrow p = 850/1000 = 0.85$), iar dacă nu există date istorice, se face un eșantion inițial (ex. verificare 200 vehicule) și folosește rezultatul ca estimare a lui p .

În ultimă instanță se pot folosi valori medii publicate (ex. rapoarte de siguranță rutieră) dacă nu există date locale, dar cu mențiunea că aceasta e doar o aproximare.

Valoarea lui p determină forma distribuției:

- Dacă p este mare (ex. 0,85), majoritatea verificărilor vor fi succese.
- Dacă p este mic (ex. 0,2), majoritatea vor fi insuccese.

Deci, alegerea corectă a lui p asigură că modelul reflectă realitatea.

$$\text{Calcul: } P(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot q^{n-k} = \binom{50}{40} \cdot p^{40} \cdot q^{10}$$

$$\binom{50}{40} = \frac{50!}{40!10!} = 10272278170$$

$$p^{40} = 0.85^{40} = 0.0062$$

$$q^{10} = 0.15^{10} = 5.77 \cdot 10^{-9}$$

$$P(X = 40) = 10272278170 \cdot 0.0062 \cdot 5.77 \cdot 10^{-9} = 0.367 \cdot 100 = 36.7 \%$$

Interpretare: Probabilitatea ca exact 40 din 50 de conducători auto să respecte limita de viteză este de aprox. 36,7%. Acest rezultat sprijină estimarea gradului de respectare a reglementărilor și justifică, de exemplu, dacă e necesară suplimentarea radarelor mobile.

Distribuția binomială negativă

Distribuția binomială negativă extinde modelul binomial pentru situațiile în care se dorește estimarea probabilității de a obține un număr fix de succese înainte de apariția unui anumit număr de insuccese. Aceasta este utilă atunci când evenimentele de interes continuă până când se atinge un prag de eșecuri.

Ecuția distribuției binomiale negative:

$$P(X = k) = \binom{k+r-1}{k} \cdot p^r \cdot (1-p)^k \quad (3.30)$$

unde: $P(X = k)$ – este probabilitatea ca până la apariția a r succese să se înregistreze k insuccese;

p – probabilitatea de succes la o singură încercare

$1 - p$ – probabilitatea de insucces

Această distribuție poate fi utilizată pentru a modela numărul de vehicule care trebuie să fie inspectate până se găsesc un număr fix de vehicule care prezintă defecțiuni tehnice. De asemenea, poate modela apariția defecțiunilor la infrastructură sau evenimente rare. Spre exemplu, o echipă de control tehnic rutier efectuează inspecții mobile pentru a identifica vehicule cu defecțiuni majore. Dacă probabilitatea ca un vehicul să prezinte defecțiuni este de 0,1, inginerul poate folosi distribuția binomială negativă pentru a estima câte verificări sunt necesare, în medie, pentru a identifica al cincilea vehicul defect. Acest lucru este important pentru planificarea resurselor și dimensionarea punctelor de control mobil.

Exemplu aplicativ: La un punct de control tehnic, inspectorii caută vehicule cu defecțiuni grave. Probabilitatea ca un vehicul să aibă defecțiuni grave este $p=0.1$. Care este probabilitatea ca inspectorii să găsească al treilea vehicul cu defecțiuni după ce au verificat 8 vehicule cu defecțiuni ușoare sau deloc (adică 8 insuccese)?

Date de intrare:

- $r = 3$ succese (vehicule defecte)
- $k = 8$ insuccese (vehicule conforme)
- $p = 0.1$

Se cere: Probabilitatea ca a treia defecțiune gravă să apară după 8 insuccese.

$$\text{Calcul: } P(X = k) = \binom{k+r-1}{k} \cdot p^k \cdot q^r = \binom{8+3-1}{8} \cdot p^3 \cdot q^8$$

$$\binom{10}{8} = \frac{10!}{8!2!} = 45$$

$$P(X = 8) = 45 \cdot 0.1^3 \cdot 0.9^8 \cdot 0.1^3 = 45 \cdot 0.001 \cdot 0.4305 = 0.0194 \cdot 100 = 1.94 \%$$

Interpretare: Probabilitatea ca inspectorii să găsească a treia defecțiune abia după ce verifică 8 vehicule conforme este de 1,94%. Un rezultat scăzut indică raritatea defectelor grave și poate justifica ajustarea periodică a controalelor.

Distribuția Poisson

Distribuția Poisson este una dintre cele mai utilizate distribuții discrete în analiza traficului rutier. Distribuția Poisson este un model de probabilitate folosit pentru a descrie numărul de evenimente discrete care au loc într-un interval de timp sau spațiu fix, dacă aceste evenimente apar independent și cu o rată medie constantă (λ).

În analiza traficului rutier, distribuția Poisson se utilizează pentru a modela:

- numărul de vehicule care ajung într-un punct de observație într-un interval scurt de timp,
- numărul de accidente pe un tronson de drum,
- numărul de defecte detectate într-o perioadă dată.

Probabilitatea ca un număr exact k de evenimente să se producă într-un interval cu o rată medie λ este dată de:

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k \cdot e^{-\lambda}}{k!} \quad (3.31)$$

Unde: $P(X = k)$ – probabilitatea ca exact k evenimente să apară

λ – rata medie de apariție a evenimentului (numărul mediu pe unitatea aleasă)

k – numărul exact de evenimente considerat

e – baza logaritmului natural ($\sim 2,71828$)

λ (lambda) se calculează pe baza datelor istorice sau măsurătorilor reale:

$$\lambda = \frac{\text{Numărul total de evenimente}}{\text{Unitatea de timp sau spațiu}} \quad (3.32)$$

k este valoarea exactă pentru care se calculează probabilitatea și se stabilește în funcție de scenariul analizat.

Exemplu aplicativ: La o intersecție intens circulată, se știe că media traficului este de 720 vehicule/oră. Se dorește probabilitatea ca în următorul minut să sosească exact 15 vehicule.

Parametri:

- Rata medie pe minut: $\lambda = 720/60 = 12$ vehicule/minut.
- Numărul dorit: $k = 15$

Se aplică ecuația 3.31: $P(X = 15) = \frac{12^{15} \cdot 2.718^{-12}}{15!} = \frac{0 \times 1.5407021574586E+16}{1.307674 \cdot 10^{12}} = 0.07248 \cdot 100 = 7.2 \%$

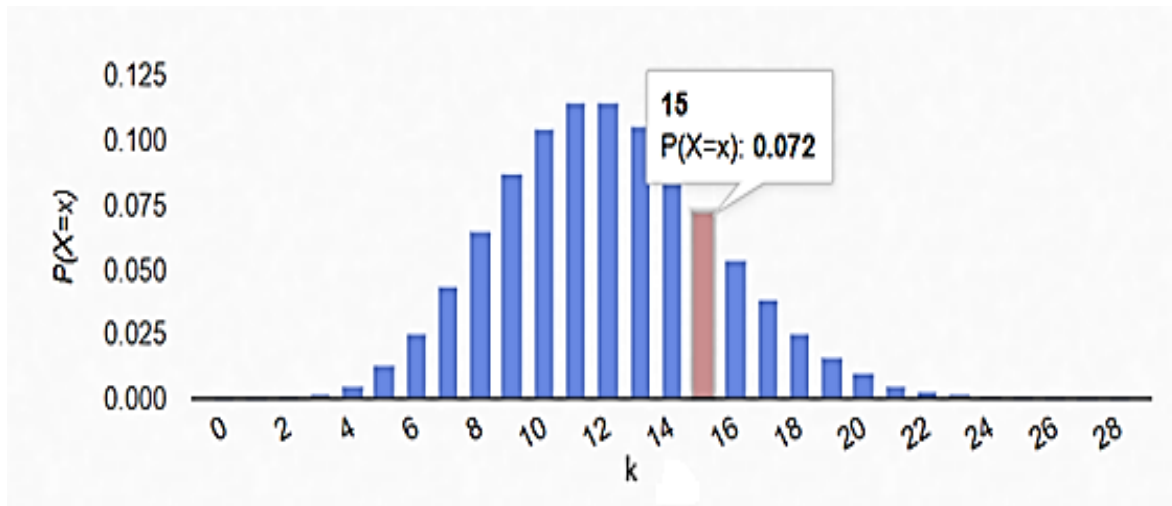


Figura 3.1. Graficul distribuției Poisson pentru exemplul calculat

Interpretare: Există o probabilitate de aproximativ 7,2% ca în următorul minut să sosească exact 15 vehicule la intersecție. Acest rezultat ajută la dimensionarea corectă a semaforizării, la stabilirea duratei ciclului de verde și la modelarea cozii de vehicule și a timpilor de așteptare.

Aceste exemple demonstrează cum distribuțiile de probabilitate discrete permit modelarea matematică a incertitudinii și cuantificarea riscurilor în trafic, oferind o bază științifică pentru:

- proiectarea și evaluarea capacității infrastructurii rutiere;
- dimensionarea personalului de control;
- stabilirea priorităților de intervenție pentru creșterea siguranței rutiere;
- fundamentarea deciziilor privind semaforizarea adaptivă sau managementul fluxurilor.

Prin integrarea acestor modele, analiza traficului rutier devine nu doar descriptivă, ci și predictivă, permițând o abordare proactivă în administrarea rețelelor de transport.

3.4. Modele de distribuție pentru variabile continue aplicate în trafic

Distribuția normală (Gauss)

Distribuția normală este folosită mai ales pentru a modela condiții de trafic specifice (ex. viteze) pe un anumit interval orar, pe un segment de drum cu trafic liber și omogen. Se caracterizează prin simetrie și forma de „clopotul lui Gauss”.

Este caracterizată prin doi parametri statici determinanți:

- Parametrul de localizare μ , care reprezintă din punct de vedere statistic, media de sondaj, asociată cu fenomenul analizat (viteze, debite...)
- Parametrul de scară, σ , care este abaterea medie pătratică sau deviația standard a șirului de date de trafic

Caracteristic acestei repartiții este indicatorul densitate de probabilitate a evenimentului, care se determină astfel:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.33)$$

unde: μ = media aritmetică

σ = deviația standard

Exemplu aplicativ: Se dau 10 măsurători de viteză pe un drum: 48, 50, 52, 49, 53, 50, 51, 52, 48, 49 km/h. Care este probabilitatea să apară o viteză de 45 km/h?

- Media: $\mu = 50.2$ km/h
- Deviația standard: $\sigma = 1.7$ km/h.

$$\text{Calcul: } f(x) = \frac{1}{1.7\sqrt{2 \cdot 3.14}} \cdot 2.71^{-\frac{(45-50.2)^2}{2 \cdot 1.7^2}} = 0.0011$$

$$P(X < x) = 0.001 \times 100 = 0.1 \%$$

Interpretare: Majoritatea vitezelor sunt concentrate în intervalul 48.5 km/h, 51.9 km/h, așadar probabilitatea ca o viteză de 45 km/h sau mai mică să apară pe grafic este de 0.1%, adică extrem de mică.

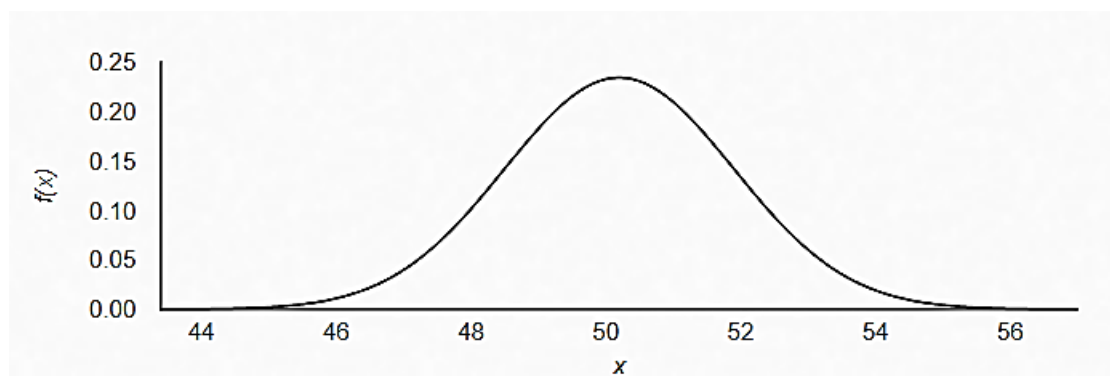


Figura 3.2. Curba de variație Gauss pentru probabilitatea de apariție a vitezei de 45 km/h

Dacă se dorește aflarea probabilității de apariție a unei viteze de 54 km/h, se reiau calculele, iar $P(X < x) = 0.98 \times 100 = 98\%$, adică extrem de mare, chiar dacă această viteză nu se află în eșantionul dat inițial.

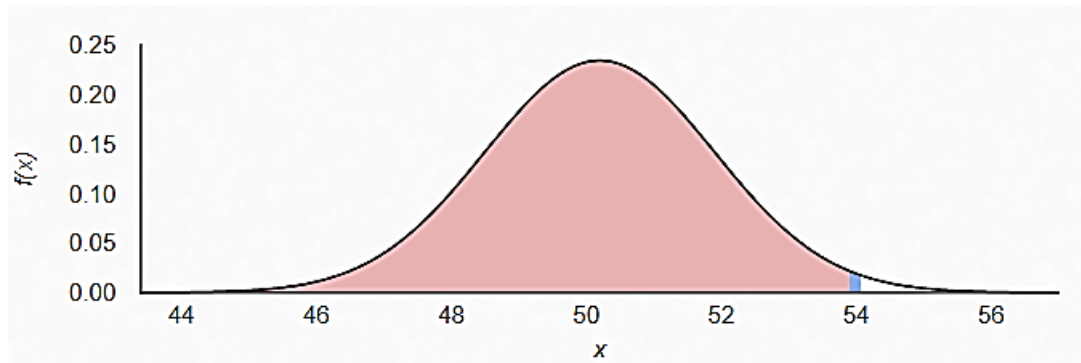


Figura 3.3. Curba de variație Gauss pentru probabilitatea de apariție a vitezei de 54 km/h

Distribuția exponențială

Distribuția exponențială este o distribuție de probabilitate pentru variabile continue pozitive, folosită pentru a modela timpul de așteptare sau distanțele dintre evenimente succesive, când acestea apar aleatoriu, cu o rată constantă.

Exemple în trafic:

- Timpul dintre două vehicule care trec printr-un punct fix (ex. un detector de buclă inductivă) pe un drum relativ liber.
- Timpul de așteptare la un semafor până la următorul vehicul.
- Intervalul de timp dintre două sosiri ale vehiculelor într-o stație de taxare.

Este utilă pentru modele de trafic necongestionat. Dacă fluxul este bine aproximat ca Poisson (sosirile sunt independente), atunci timpul dintre sosiri urmează o distribuție exponențială.

Funcția de densitate este:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0 \quad (3.34)$$

Unde: x = timpul dintre sosiri sau distanța dintre vehicule (măsurat continuu)

λ = rata medie de apariție (de ex. numărul de vehicule pe unitatea de timp)

Funcția de distribuție cumulativă arată probabilitatea ca timpul dintre două vehicule să fie mai mic decât o anumită valoare x .

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (3.35)$$

Parametru cheie: rata medie λ

- Dacă în medie sosesc 12 vehicule pe minut: $\lambda=12$ vehicule/minut
- Timpul mediu între sosiri este: $E(X)=1/\lambda=1/12=5$ secunde

Exemplu aplicativ: Pe o stradă cu flux redus, rata medie de sosire este de 20 vehicule pe oră.

$$\lambda = 20/60 = 0.3333 \text{ vehicule/minut}$$

Timpu mediu de sosire între două vehicule:

$$E(X) = 1/\lambda = 3 \text{ minute}$$

Probabilitatea ca un vehicul să sosească în mai puțin de 2 minute:

$$F(2) = 1 - e^{-0.3333 \times 2} = 1 - e^{-0.6667} = 1 - 0.5134 = 0.4866$$

Așadar, calculul arată că există aprox. 49% șanse ca următorul vehicul să sosească în maximum 2 minute.

Distribuția log-normală

Distribuția log-normală se folosește frecvent pentru a modela vitezele vehiculelor pe drumuri unde majoritatea conducătorilor auto circulă cu viteze apropiate de o valoare centrală, dar o mică parte poate depăși mult viteza medie (de exemplu, pe drumuri urbane aglomerate unde limita e 50 km/h dar unii conducători auto rulează cu 70–80 km/h).

Funcția de densitate log-normală

Dacă X este o variabilă log-normală, atunci:

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, x > 0 \quad (3.36)$$

unde: μ = media aritmetică

σ = deviația standard

Exemplu aplicativ: Se înregistrează vitezele a 10 vehicule, într-o zonă urbană: 42, 45, 50, 48, 55, 52, 60, 58, 65, 70 km/h

Pașii de calcul sunt:

1. Se transformă vitezele cu logaritmul natural: $y_i = \ln(x_i)$
2. Se calculează media și deviația standard a valorilor logaritmice:

$$\ln(42) = 3.74;$$

$$\ln(45) = 3.81$$

$$\ln(50) = 3.91$$

$$\ln(48) = 3.87$$

$$\ln(55) = 4.01$$

$$\ln(52) = 3.95$$

$$\ln(60) = 4.09$$

$$\ln(58) = 4.06$$

$$\ln(65) = 4.17$$

$$\ln(70) = 4.25$$

$$\text{Media logaritmică: } \mu = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} y_i = \frac{3.74+3.81+3.91+3.87+4.01+3.95+4.09+4.06+4.17+4.25}{10} = 4$$

$$\text{Deviația standard logaritmică: } \sum (y_i - \mu)^2 = 0.256 \rightarrow \sigma = \sqrt{\frac{0.256}{9}} = 0.17$$

Așadar, dacă $\mu = 4$ și $\sigma = 0.17$, atunci ce probabilitate există ca viteza să fie sub 55 km/h?

$$\ln(55) = 4.01$$

Apoi se va utiliza *variabila standardizată*, Z , care transformă o valoare x din distribuția log-normală (sau normală) într-o valoare din distribuția normală standard $N(0,1)$, adică o distribuție normală cu medie 0 și abatere standard 1.

$$Z = \frac{\ln(55) - \mu}{\sigma} = \frac{4.01 - 4}{0.17} = 0.06$$

Apoi utilizând tabelul variabilei Z , standardizate, pe coloana 0.06, la linia Z_0 reiese că:

$$P(Z < 0.06) = 0.52392.$$

Tabelul 3.1. Variabila standardizată, Z

Z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
-1.4	0.08076	0.07927	0.07780	0.07636	0.07493	0.07353	0.07215	0.07078	0.06944	0.06811
-1.3	0.09680	0.09510	0.09342	0.09176	0.09012	0.08851	0.08691	0.08534	0.08379	0.08226
-1.2	0.11507	0.11314	0.11123	0.10935	0.10749	0.10565	0.10383	0.10202	0.10027	0.09853
-1.1	0.13567	0.13350	0.13136	0.12924	0.12714	0.12507	0.12302	0.12100	0.11900	0.11702
-1.0	0.15866	0.15625	0.15386	0.15151	0.14917	0.14686	0.14457	0.14231	0.14007	0.13786
-0.9	0.18406	0.18141	0.17879	0.17619	0.17361	0.17106	0.16853	0.16602	0.16354	0.16109
-0.8	0.21186	0.20897	0.20611	0.20327	0.20045	0.19766	0.19489	0.19215	0.18943	0.18673
-0.7	0.24196	0.23885	0.23576	0.23270	0.22965	0.22663	0.22362	0.22062	0.21770	0.21476
-0.6	0.27425	0.27093	0.26763	0.26435	0.26109	0.25785	0.25463	0.25143	0.24825	0.24510
-0.5	0.30854	0.30503	0.30153	0.29806	0.29460	0.29116	0.28774	0.28434	0.28096	0.27760
-0.4	0.34458	0.34090	0.33724	0.33360	0.32997	0.32636	0.32276	0.31918	0.31561	0.31207
-0.3	0.38209	0.37828	0.37448	0.37070	0.36693	0.36317	0.35942	0.35569	0.35197	0.34827
-0.2	0.42074	0.41683	0.41294	0.40905	0.40517	0.40129	0.39743	0.39358	0.38974	0.38591
-0.1	0.46017	0.45620	0.45224	0.44828	0.44433	0.44038	0.43644	0.43251	0.42858	0.42465
0.0	0.50000	0.50399	0.50798	0.51197	0.51595	0.51994	0.52392	0.52790	0.53188	0.53586
0.1	0.53983	0.54380	0.54776	0.55172	0.55567	0.55962	0.56356	0.56749	0.57142	0.57535
0.2	0.57926	0.58317	0.58706	0.59095	0.59483	0.59871	0.60257	0.60642	0.61026	0.61409
0.3	0.61791	0.62172	0.62552	0.62930	0.63307	0.63683	0.64058	0.64431	0.64803	0.65173
0.4	0.65542	0.65910	0.66276	0.66640	0.67003	0.67364	0.67724	0.68082	0.68439	0.68793
0.5	0.69146	0.69497	0.69847	0.70194	0.70540	0.70884	0.71226	0.71566	0.71904	0.72240
0.6	0.72575	0.72907	0.73237	0.73565	0.73891	0.74215	0.74537	0.74857	0.75175	0.75490
0.7	0.75804	0.76115	0.76424	0.76730	0.77035	0.77337	0.77637	0.77935	0.78230	0.78524
0.8	0.78814	0.79103	0.79389	0.79673	0.79955	0.80234	0.80511	0.80785	0.81057	0.81327
0.9	0.81594	0.81859	0.82121	0.82381	0.82639	0.82894	0.83147	0.83398	0.83646	0.83891
1.0	0.84134	0.84375	0.84614	0.84849	0.85083	0.85314	0.85543	0.85769	0.85993	0.86214
1.1	0.86433	0.86650	0.86864	0.87076	0.87286	0.87493	0.87698	0.87900	0.88100	0.88298
1.2	0.88493	0.88686	0.88877	0.89065	0.89251	0.89435	0.89617	0.89796	0.89973	0.90147
1.3	0.90320	0.90490	0.90658	0.90824	0.90988	0.91149	0.91309	0.91466	0.91621	0.91774
1.4	0.91924	0.92073	0.92220	0.92364	0.92507	0.92647	0.92785	0.92922	0.93056	0.93189

Așadar, aproximativ 52,4% dintre vehicule merg cu viteza sub 55 km/h.

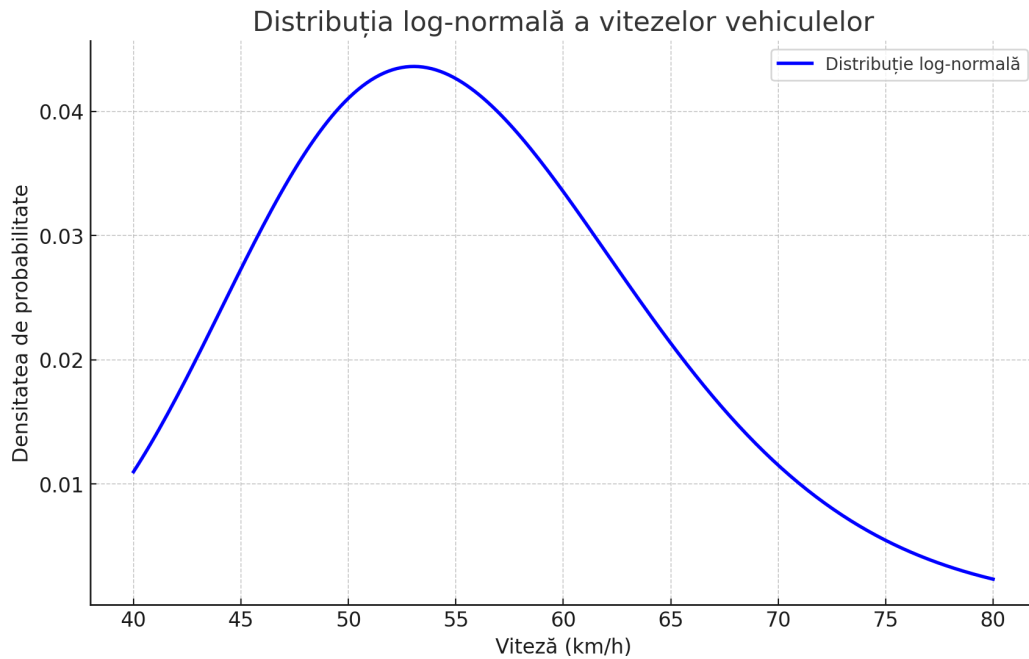


Figura 3.4. Graficul distribuției log-normală a vitezelor

Interpretare: Graficul arată cum vitezele sunt distribuite asimetric, majoritatea vehiculelor circulă în jurul valorii centrale (aprox. 55 km/h), dar o parte pot depăși 65–70 km/h, ceea ce justifică folosirea distribuției log-normale pentru modelarea vitezelor într-o zonă urbană aglomerată.

3.5. Criteriul de validare a distribuțiilor - χ^2

Testul Chi-pătrat χ^2 de adecvare (*goodness-of-fit*) este o metodă statistică folosită pentru a verifica dacă distribuția observată a unui set de date coincide cu o distribuție teoretică ipotetizată (Ex. binomială, Poisson, normală).

Scopul său este de a evalua dacă diferențele dintre frecvențele observate și cele teoretice sunt suficient de mici pentru a putea accepta ipoteza că datele urmează distribuția presupusă.

Statistică testului Chi-pătrat se calculează astfel:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3.37)$$

unde: O_i - frecvența observată în clasa i

E_i - frecvența așteptată (teoretică) în clasa i

k - numărul de clase/intervale

Tabelul 3.2. Distribuția standardizată a χ^2

df	Grade de libertate										
	0.995	0.975	0.2	0.1	0.05	0.025	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.00004	0.00098	1.642	2.706	3.841	5.024	5.412	6.635	7.879	9.55	10.83
2	0.01	0.0506	3.219	4.605	5.991	7.378	7.824	9.21	10.6	12.43	13.82
3	0.0717	0.216	4.642	6.251	7.815	9.348	9.837	11.35	12.84	14.8	16.27
4	0.207	0.484	5.989	7.779	9.488	11.14	11.67	13.28	14.86	16.92	18.47
5	0.412	0.831	7.289	9.236	11.07	12.83	13.39	15.09	16.75	18.91	20.52
6	0.676	1.237	8.558	10.65	12.59	14.45	15.03	16.81	18.55	20.79	22.46
7	0.989	1.69	9.803	12.02	14.07	16.01	16.62	18.48	20.28	22.6	24.32
8	1.344	2.18	11.03	13.36	15.51	17.54	18.17	20.09	21.96	24.35	26.12
9	1.735	2.7	12.24	14.68	16.92	19.02	19.68	21.67	23.59	26.06	27.88
10	2.156	3.247	13.44	15.99	18.31	20.48	21.16	23.21	25.19	27.72	29.59
11	2.603	3.816	14.63	17.28	19.68	21.92	22.62	24.73	26.76	29.35	31.26
12	3.074	4.404	15.81	18.55	21.03	23.34	24.05	26.22	28.3	30.96	32.91
13	3.565	5.009	16.99	19.81	22.36	24.74	25.47	27.69	29.82	32.54	34.53
14	4.075	5.629	18.15	21.06	23.69	26.12	26.87	29.14	31.32	34.09	36.12
15	4.601	6.262	19.31	22.31	25	27.49	28.26	30.58	32.8	35.63	37.7
16	5.142	6.908	20.47	23.54	26.3	28.85	29.63	32	34.27	37.15	39.25
17	5.697	7.564	21.62	24.77	27.59	30.19	31	33.41	35.72	38.65	40.79
18	6.265	8.231	22.76	25.99	28.87	31.53	32.35	34.81	37.16	40.14	42.31
19	6.844	8.907	23.9	27.2	30.14	32.85	33.69	36.19	38.58	41.61	43.82
20	7.434	9.591	25.04	28.41	31.41	34.17	35.02	37.57	40	43.07	45.32

Tabelul prezintă valorile critice ale distribuției χ^2 (Chi-pătrat) pentru diferite grade de libertate (df) și niveluri de semnificație, utilizate în testele de adecvare, independență și omogenitate.

Pașii de aplicare:

1. Se formulează ipoteza: de ex. „Numărul de vehicule care ajung la o intersecție într-un minut urmează o distribuție Poisson.”
2. Se împart datele în clase (intervale) și se numără câte observații reale sunt pe fiecare clasă.
3. Se calculează frecvențele așteptate pe baza distribuției ipotetice (folosind parametrii estimați: medie, λ , p etc.).
4. Se calculează χ^2 folosind formula de mai sus.
5. Se compară valoarea χ^2 calculată cu valoarea critică din tabelele statistice pentru un anumit nivel de semnificație (α , de obicei 0,05) și grade de libertate $df = k - p - 1$ (unde $p =$ nr. parametri estimați).
6. Se decide: dacă χ^2 calculată $<$ χ^2 tabelară \rightarrow se acceptă ipoteza de distribuție. Altfel, se respinge.

Exemplu aplicativ: Se monitorizează pentru 30 minute un sector de drum, iar rezultatele măsurătorilor sunt:

- Monitorizare: **30 intervale** de câte 1 minut.
- În total: **90 vehicule** trecute.
- Deci media = 3 vehicule/minut.

Tabelul 3.3. Vehicule observate

Nr. vehicule/minut	0	1	2	3	4	5	Total
Frecvență observată (O_i)	2	4	8	10	4	2	30

Distribuția Poisson:

Parametru: $\lambda = 3$

Probabilități: Se înlocuiește $\lambda = 3$ în ecuația 3.30 și rezultă tabelul:

Tabelul 3.4. Probabilitățile Poisson

k	$P(X=k)$	$E_i = n \cdot P(X=k)$
0	$e^{-3} \times 3^0 / 0! = 0.0498$	$30 \times 0.0498 = 1.49$
1	$e^{-3} \times 3^1 / 1! = 0.1494$	$30 \times 0.1494 = 4.48$
2	$e^{-3} \times 3^2 / 2! = 0.2240$	$30 \times 0.2240 = 6.72$
3	$e^{-3} \times 3^3 / 3! = 0.2240$	$30 \times 0.2240 = 6.72$
4	$e^{-3} \times 3^4 / 4! = 0.1680$	$30 \times 0.1680 = 5.04$
5+	restul probabilității ≈ 0.185	$30 \times 0.185 = 5.55$
Total		30

Criteriul χ^2 se calculează pentru fiecare clasă k, cu ecuația 3.37 și rezultă tabelul:

Tabelul 3.5. Rezultatele χ^2 pentru distribuția Poisson

k	O_i	E_i	$(O_i - E_i)^2 / E_i$
0	2	1.49	0.17
1	4	4.48	0.05
2	8	6.72	0.25
3	10	6.72	1.60
4	4	5.04	0.22
5+	2	5.55	2.27
Σ			4.56

Așadar χ^2 pentru distribuția Poisson este 4.56.

Distribuția binomială

Parametru: $n = 5$

$$p = 0.6$$

Se utilizează ecuația 3.27 și se obține tabelul:

Tabelul 3.6. Probabilitățile Binomiale

k	P(X=k)	E_i
0	$C(5,0) \times 0.6^0 \times 0.4^5 = 0.0102$	0.31
1	$C(5,1) \times 0.6^1 \times 0.4^4 = 0.0768$	2.30
2	$C(5,2) \times 0.6^2 \times 0.4^3 = 0.2304$	6.91
3	$C(5,3) \times 0.6^3 \times 0.4^2 = 0.3456$	10.37
4	$C(5,4) \times 0.6^4 \times 0.4^1 = 0.2592$	7.78
5	$C(5,5) \times 0.6^5 \times 0.4^0 = 0.0778$	2.33
Total		30

Criteriul χ^2 se calculează pentru fiecare clasă k, cu ecuația 3.37 și rezultă tabelul:

Tabelul 3.7. Rezultatele χ^2 pentru distribuția binomială

k	O_i	E_i	(O_i-E_i)²/E_i
0	2	0.31	9.04
1	4	2.30	1.28
2	8	6.91	0.17
3	10	10.37	0.01
4	4	7.78	1.83
5	2	2.33	0.05
Σ			12.38

Așadar χ^2 pentru distribuția Binomială este 12.38.

Compararea cu tabelul standardizat χ^2

Grade de libertate = număr clase – parametri estimați – 1.

De ex.: $k = 5 - 1 - 1 = 3 \rightarrow \chi^2$ critic = 7.815 (pentru $\alpha=0.05$ – din tabelul 3.2)

Astfel că: Rezultatul distribuției Poisson este $4.56 < 7.815 \rightarrow$ model acceptat

Rezultatul distribuției binomiale este $12.38 > 7.815 \rightarrow$ model respins

În acest exemplu, distribuția Poisson este cea mai potrivită pentru numărul de vehicule/minut.

4. Fundamente teoretice ale traficului rutier

Traficul rutier reprezintă o interacțiune complexă între conducători auto, autovehicule și infrastructura rutieră, generând fenomene dinamice care pot fi descrise și analizate cu ajutorul unor fundamente teoretice solide. Înțelegerea principiilor de bază care guvernează deplasarea autovehiculelor și comportamentul conducătorilor auto este esențială pentru proiectarea și optimizarea rețelelor de transport.

Cinematica deplasării vehiculului constituie punctul de pornire pentru orice analiză detaliată, oferind parametrii microscopici care descriu mișcarea individuală a fiecărui autovehicul pe carosabil. Parametrii microscopici precum viteza instantanee, accelerația, decelerația și distanța de urmărire definesc comportamentul individual al unui autovehicul în raport cu alte autovehicule și cu mediul înconjurător.

Dinamica deplasării unui singur autovehicul poate părea simplă, însă devine extrem de complexă atunci când interacționează cu alte autovehicule, generând formarea plutonului de vehicule. Dinamica plutonului de vehicule reflectă modul în care conducătorii auto își adaptează viteza, distanța de siguranță și comportamentul de frânare pentru a menține fluxul de trafic. La nivel macroscopic, parametrii traficului, cum ar fi densitatea vehiculelor, intensitatea (debitul) și viteza medie de deplasare, oferă o imagine de ansamblu asupra performanței rețelei rutiere.

Analiza relațiilor dintre acești parametri macroscopici stă la baza evaluării gradului de congestie, a capacității drumului și a nivelului de serviciu oferit utilizatorilor rețelei. Relațiile fundamentale între viteză, debit și densitate pot fi reprezentate grafic sub formă de diagrame, care permit inginerilor de trafic să identifice punctele de funcționare a unui segment de drum. Aceste diagrame fundamentale sunt indispensabile pentru modelarea fluxului de trafic și pentru fundamentarea deciziilor de reglementare și management al circulației.

În paralel cu analiza parametrilor fizici, studiile de tip Origine–Destinație sunt esențiale pentru a înțelege cum se deplasează fluxurile de autovehicule în rețelele urbane sau regionale. Analiza Origine–Destinație permite identificarea coridoarelor principale de trafic, a punctelor de congestie și a direcțiilor preferate de deplasare ale conducătorilor auto. Integrarea datelor de Origine–Destinație în modelele macroscopice contribuie la simularea fluxurilor de trafic și la prognozarea cererii de transport în scenarii viitoare.

Capacitatea de trafic a unei artere rutiere urbane reprezintă un alt element al fundamentelor teoretice, influențând direct nivelul de serviciu și gradul de confort al participanților la trafic. Determinarea capacității implică utilizarea unor principii și metode de calcul validate, care țin cont de tipul infrastructurii, comportamentul conducătorilor auto și caracteristicile fluxului de autovehicule. Metodele de calcul al capacității combină aspectele

microscopice și macroscopice ale traficului, asigurând o dimensionare adecvată a secțiunilor de drum și a intersecțiilor.

Prin corelarea tuturor acestor elemente – cinematică, dinamică, relații fundamentale, analiză Origine–Destinație și calculul capacității – se obține o abordare integrată a planificării și gestionării rețelei rutiere.

Fără o bază teoretică solidă, implementarea măsurilor de optimizare și dezvoltare a infrastructurii rutiere riscă să devină inefficientă sau chiar contraproductivă. Fundamentele teoretice ale traficului rutier nu constituie doar un exercițiu academic, ci un instrument practic care ghidează proiectanții, inginerii de trafic și autoritățile responsabile de mobilitate.

Înțelegerea și aplicarea corectă a principiilor din acest capitol sunt primordiale pentru un trafic rutier sigur, fluent și adaptat nevoilor actuale și viitoare ale comunităților urbane și periurbane.

4.1. Cinematica deplasării vehiculului și parametrii microscopici ai traficului rutier

Cinematica deplasării autovehiculului se ocupă cu descrierea mișcării acestuia fără a lua în calcul forțele care o generează. Se analizează parametrii fundamentali precum poziția, viteza și accelerația pe parcursul deplasării pe un segment de drum.

Studiul cinematicii deplasării autovehiculelor este un punct de pornire în analiza traficului rutier, întrucât orice proiectare a unui drum, orice sistem de semaforizare sau orice evaluare de siguranță pornește de la înțelegerea modului în care autovehiculele își modifică traiectoria în timp și spațiu. Prin observarea modului în care acestea se deplasează pe diferite sectoare de drum, inginerii de trafic pot estima condițiile de circulație și pot anticipa problemele potențiale.

Orice deplasare pe un drum poate fi descrisă prin relații simple care exprimă cum variază traiectoria unui autovehicul în funcție de durata călătoriei și de condițiile de rulare. De exemplu, pe un drum expres, un autovehicul care circulă constant între două noduri rutiere poate parcurge distanța totală într-un timp fix, iar această relație simplă este baza calculului timpilor de parcurs și al planificării fluxurilor.

Un exemplu comun este deplasarea pe un segment de drum cu restricție de viteză fixă. Conducătorii auto își ajustează comportamentul astfel încât să mențină o deplasare cât mai uniformă, ceea ce permite previzionarea precisă a duratei de parcurs între două puncte de interes. În aceste condiții, efectele unor opriri sau frânări bruște sunt reduse, iar fluxul de trafic rămâne fluent.

În contrast, pe un drum urban cu intersecții multiple, semafoare și treceri pentru pietoni, traiectoria unui autovehicul este fragmentată de opriri și reporniri succesive. Aceste variații generează creșteri și descreșteri repetate ale vitezei, iar deplasarea devine o succesiune de segmente scurte, fiecare cu propriul comportament cinematic.

Deplasarea pe drumurile montane oferă un alt exemplu relevant. Aici, schimbările de altitudine și succesiunea de curbe strânse determină variații specifice în modul de rulare, conducătorii auto fiind nevoiți să adapteze traiectoria astfel încât să mențină controlul și stabilitatea autovehiculului în condiții de pantă și rampă.

În regim de autostradă, comportamentul cinematic este, în general, mai predictibil. Conducătorii auto se aliniază pe benzi, își aleg traiectoria astfel încât să minimizeze schimbările bruște de direcție și să păstreze o deplasare constantă pe distanțe mari. Această uniformitate este importantă pentru menținerea unui debit mare de trafic și reducerea riscului de congestie.

Pe drumurile colectoare, unde fluxurile de intrare și ieșire se succed rapid, traiectoria autovehiculelor devine mult mai variabilă. Intrările și ieșirile frecvente de pe benzile laterale modifică în permanență condițiile de deplasare pe benzile principale, ceea ce necesită adaptări rapide ale traiectoriei și modificări repetate ale direcției de deplasare.

Un alt exemplu concret este comportamentul la intersecțiile cu sens giratoriu. Aici, traiectoria autovehiculelor este o curbă controlată, care obligă la ajustarea continuă a direcției. Conducătorii auto trebuie să adapteze modul de intrare și ieșire din sens astfel încât să evite coliziunile și să fluidizeze fluxul de circulație.

În zona de intrare pe o rampă de accelerare, traiectoria de deplasare devine importantă pentru realizarea unei inserții sigure în fluxul de pe banda principală. Conducătorul auto trebuie să sincronizeze traiectoria cu viteza de deplasare a autovehiculelor de pe banda principală, astfel încât să reducă la minimum perturbările în circulație.

Parametrul microscopic – Poziția vehiculului (x)

Poziția, notată convențional cu x , reprezintă locul precis ocupat de un autovehicul pe axa longitudinală a drumului la un moment dat. Este un parametru esențial în studiul traficului rutier la nivel microscopic, deoarece permite urmărirea deplasării individuale a fiecărui autovehicul pe parcursul unei porțiuni de drum.

În analizele microscopice, cunoașterea poziției permite:

- Reconstituirea traiectoriei unui autovehicul în timp.
- Calculul distanței parcurse într-un interval.
- Evaluarea spațiului liber față de vehiculul din față (*headway* sau *gap*).
- Simularea dinamicii coloanelor de vehicule și comportamentului de urmărire.

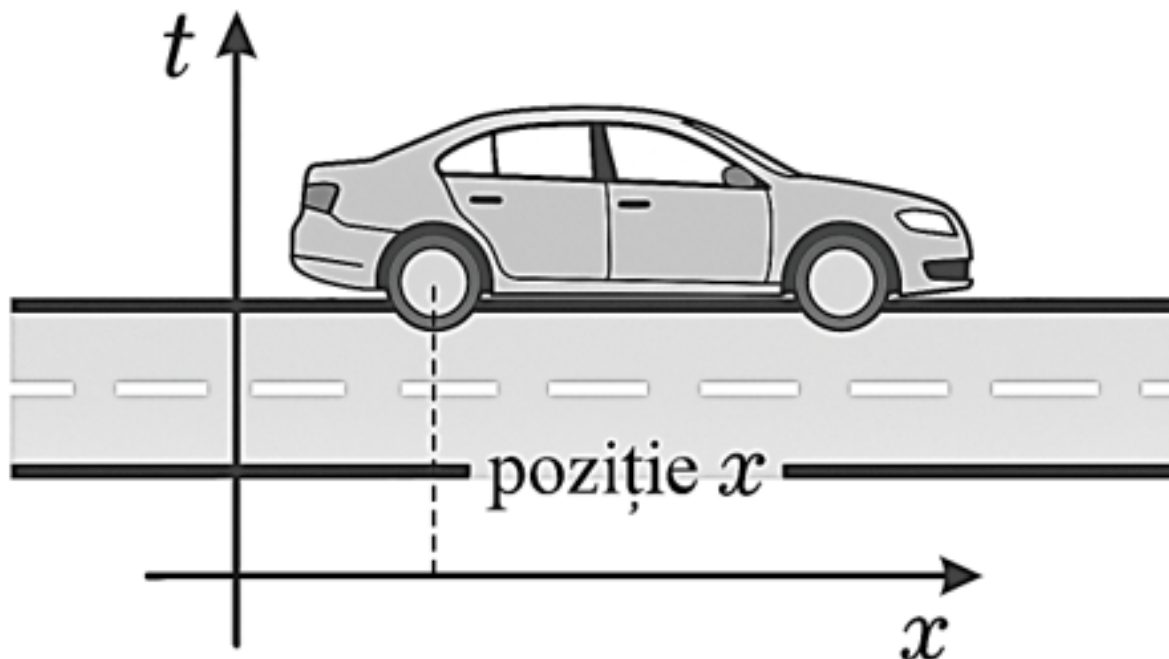


Figura 4.1. Poziția vehiculului

Exemplu aplicativ: Se presupune un sector de drum drept de 500 m. La momentul $t = 0$, autovehiculul A se află la poziția $x = 120$ m față de punctul de referință (ex.: începutul sectorului). La $t = 5$ s, poziția sa este $x = 160$ m. Astfel, deplasarea pe acest interval este de 40 m.

Poziția exactă este baza pentru calculul altor parametri derivați: viteza instantanee (v) și accelerația (a). De exemplu, cunoscând două poziții la momente diferite, viteza medie pe intervalul respectiv poate fi estimată cu:

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Poziția este folosită direct în:

- Modele de simulare microscopică (ex.: *car-following models*).
- Sisteme de asistență la conducere (ADAS) care monitorizează distanța față de vehiculul din față.
- Sisteme automate de detecție cu senzori LIDAR, radar sau GNSS, care urmăresc poziția fiecărui vehicul în timp real.

Parametrul microscopic – Viteza instantanee a vehiculului (v)

Viteza este un parametru care evidențiază direct comportamentul unui autovehicul pe un segment de drum, reflectând rapiditatea cu care acesta își modifică poziția în timp. Datorită caracterului său dinamic, viteza este unul dintre cei mai importanți indicatori ai performanței și siguranței deplasării pe infrastructura rutieră.

Este parametrul cu cea mai mare rată de utilizare în proiectarea, exploatarea și optimizarea traficului rutier, fiind util pentru evaluarea capacității drumurilor, stabilirea limitelor de viteză, dimensionarea semnalizării, proiectarea intersecțiilor și a rampelor de acces.

Din punct de vedere fizic, viteza reprezintă raportul dintre deplasarea efectuată și durata în care aceasta se realizează, având ca unitate de măsură metrii pe secundă (m/s) sau kilometri pe oră (km/h).

Dacă se consideră poziția la momentul $t \rightarrow x(t)$, atunci viteza instantanee se determină astfel:

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (4.2)$$

Vitezele instantanee sunt măsurate din exterior de radare sau din interior, de computerul de bord al autovehiculului.

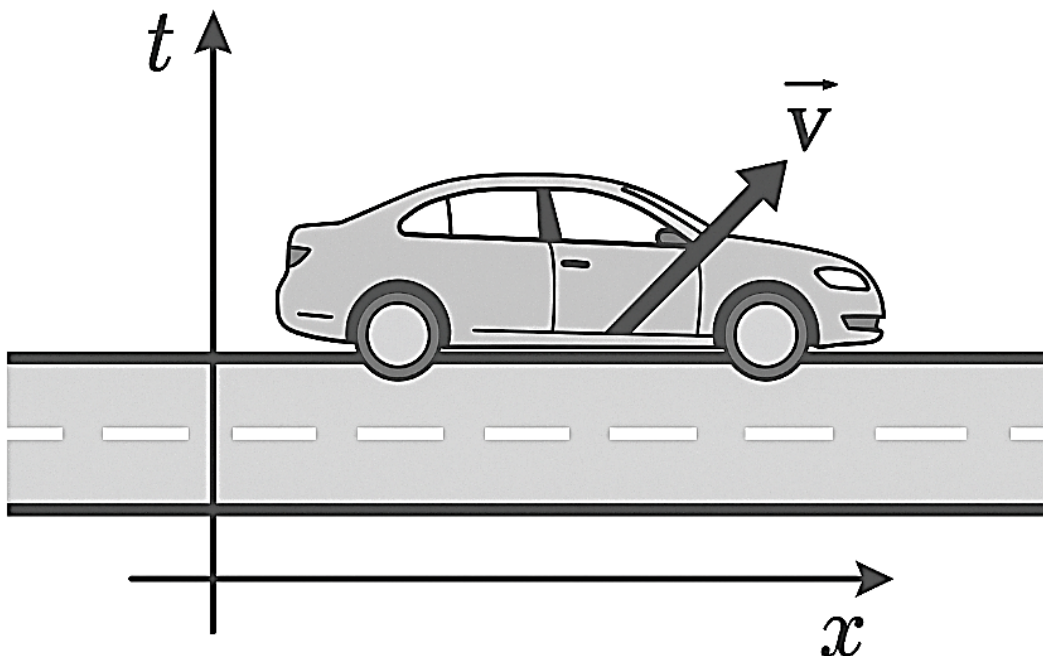


Figura 4.2. Viteza vehiculului singular

Viteza permite determinarea timpului de parcurgere, estimarea distanțelor de frânare și calculul fluxurilor de vehicule pe rețeaua rutieră. Cunoașterea distribuției vitezelor este

importantă în studiile de siguranță rutieră, evaluarea riscurilor de coliziune și elaborarea strategiilor de calmare a traficului.

Astfel, viteza, în interdependență cu poziția și accelerația, formează nucleul parametrilor microscopici ai traficului, fundamentând toate modelele cinetice și dinamice utilizate în planificarea și managementul mobilității urbane și interurbane.

În figura 4.3. sunt detaliate valorile vitezelor înregistrate pentru fiecare vehicul care a trecut prin fața observatorului (radar). De asemenea se observă detalierea statistică a dispersiei (percentile), prin raportate la viteza medie: anume V15 – număr de vehicule care se deplasează cu mai puțin de 15% din viteza medie, și V85 – număr de vehicule care se deplasează cu peste 85% față de viteza medie.

date	time	Count	Speed bins [km/h]										v15	vm	v85
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	>90			
11/13/2019	10:00:00 AM	38	0	3	0	0	0	2	7	13	9	4	68	71.84	83.64
11/13/2019	11:00:00 AM	56	0	0	2	1	3	3	5	17	12	13	70	75.7	87.38
11/13/2019	12:00:00 PM	69	0	0	0	2	2	8	13	17	13	14	69.83	75.74	90.21
11/13/2019	1:00:00 PM	47	0	0	0	1	0	2	10	8	15	11	74.83	80.68	93.21
11/13/2019	2:00:00 PM	54	0	0	0	0	2	2	10	15	17	8	72.61	77.74	88.88
11/13/2019	3:00:00 PM	63	0	0	0	0	0	3	12	19	17	12	73.17	78.65	88.87
11/13/2019	4:00:00 PM	48	0	0	0	0	0	4	5	18	13	8	74.79	79.77	93.82
11/13/2019	5:00:00 PM	55	0	1	0	0	3	4	11	12	13	11	68.53	74.18	86.57
11/13/2019	6:00:00 PM	37	0	0	0	0	0	5	5	12	9	6	72.17	77.11	89.94
11/13/2019	7:00:00 PM	47	2	1	1	0	1	2	7	13	10	10	69.43	75	91.38
11/13/2019	8:00:00 PM	20	0	0	0	0	0	2	7	7	1	3	68.38	74.15	87.56
11/13/2019	9:00:00 PM	23	0	0	0	0	0	0	3	7	9	4	76.22	81.13	89.91
11/13/2019	10:00:00 PM	10	0	0	0	0	0	1	2	0	4	3	84.75	86.3	106
11/13/2019	11:00:00 PM	13	0	0	0	0	0	1	0	4	3	5	80.5	86.77	100.17
11/13/2019	12:00:00 AM	7	0	0	0	0	0	1	1	2	1	2	78	83.86	100.75

Figura 4.3. Exemplu de distribuție a vitezelor colectate cu radar SDR – Data Collect

De asemenea, aceste viteze instantanee se pot dispune și grafic (figura 4.3), pentru o urmărire mai facilă a variațiilor pe parcursul a 24 ore.

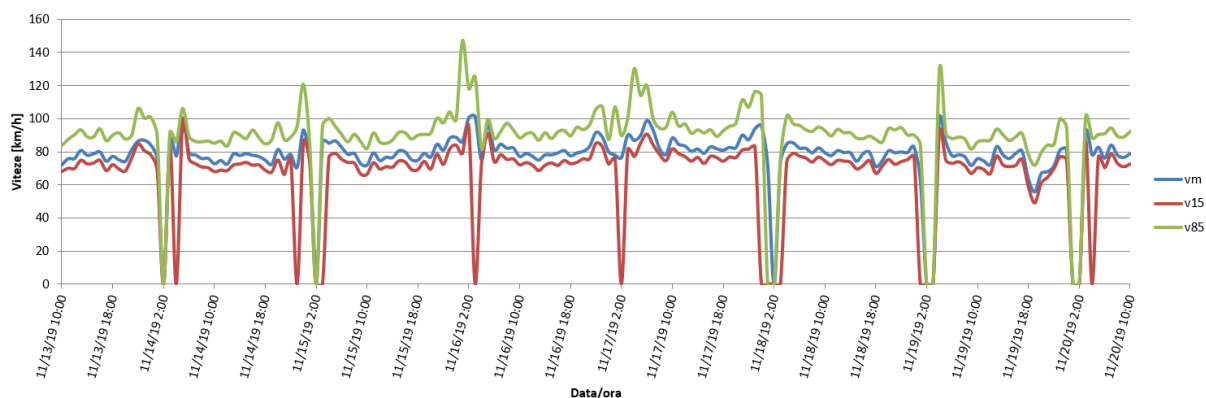


Figura 4.4. Dispunerea grafică a vitezelor instantanee

Parametrul microscopic – Accelerația vehiculului (a)

Accelerația vehiculului singular este indicatorul microscopic care permite determinarea fidelă a dinamicii vehiculului, în special în parcurs urban. Accelerația, notată cu a , reprezintă variația vitezei autovehiculului în timp. Ea exprimă cât de repede își modifică un autovehicul viteza de deplasare pe direcția longitudinală.

Determinările efectuate în diverse medii urbane populate au arătat o variație a accelerației de $\pm 2.5 \text{ m/s}^2$, corespunzătoare unui regim de exploatare în condiții de trafic aleatoriu.

Rolul accelerației este important pentru:

- Descrierea comportamentului de pornire, frânare sau schimbare a vitezei.
- Modele de simulare a interacțiunii dintre conducătorii auto.
- Analiza fluxului de vehicule în condiții de congestie.
- Proiectarea rampelor de accelerație și frânare.

Un a pozitiv indică accelerare, iar un a negativ indică decelerare (frânare). Cunoașterea accelerației permite:

- Estimarea distanței necesare pentru oprire.
- Stabilirea distanțelor de siguranță.
- Modelarea manevrelor de depășire.

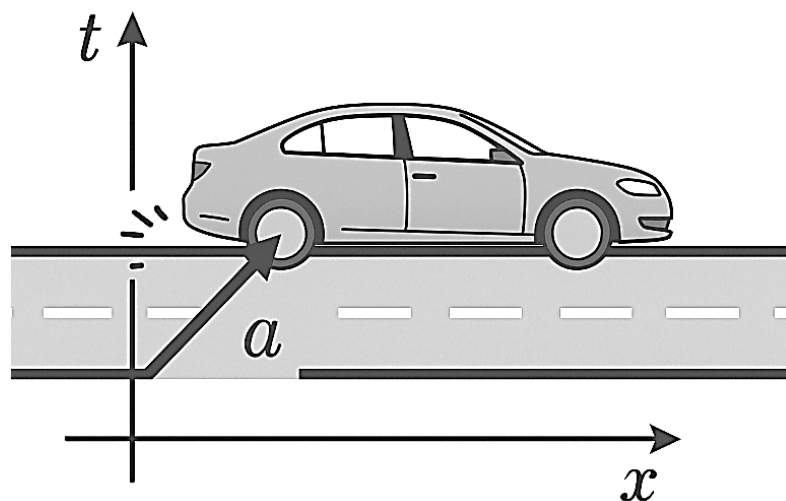


Figura 4.5. Accelerația vehiculului singular

Determinarea accelerației se face prin trei căi:

- Analitic, prin relații din teoria dinamicii autovehiculului
- Prin prelucrarea datelor obținute în urma unor înregistrări de viteze din trafic, corelate cu o variabilă de timp sau spațiu
- Experimental, prin derularea unor măsurători utilizând un vehicul martor și un decelerometru.

Accelerația instantanee se determină analitic cu relația:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (4.3)$$

Accelerația medie pe un interval se determină cu relația:

$$a_{med} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (4.4)$$

Exemplu aplicativ: Un autovehicul circulă cu 40 km/h (11.11 m/s) la intrarea într-o intersecție. După 5 s, viteza este 70 km/h (19.44 m/s).

Accelerația medie: $a_{med} = \frac{19.44 - 11.11}{5} = 1.67 \text{ m/s}^2$

Pentru determinarea experimentală a accelerației/decelerației se utilizează decelerometrul. Un decelerometru este un instrument portabil special conceput pentru a măsura decelerația unui autovehicul, adică rata cu care acesta își reduce viteza în timpul frânării.

Scopul principal al unui decelerometru este să ofere date precise privind eficiența sistemului de frânare, indicând dacă un autovehicul respectă standardele legale de siguranță în trafic.

Dispozitivul conține un senzor de accelerare care detectează forțele de decelerație produse atunci când autovehiculul frânează. Testul se efectuează cu dispozitivul care este așezat ferm pe o suprafață plană în interiorul vehiculului (de obicei pe podeaua din față), se inițiază măsurarea, iar conducătorul auto efectuează o frânare completă de la o viteză prestabilită.

Senzorul înregistrează instantaneu valorile de decelerare, iar procesorul din interior le transformă în indicatori interpretabili, precum forța de frânare și timpul de oprire.

Deși este conceput în principal pentru a măsura decelerația în timpul frânării, un decelerometru poate, în cele mai multe cazuri, să fie folosit și pentru a evalua accelerația unui autovehicul, dacă aparatul are un senzor bidirecțional (pentru accelerație pozitivă și negativă).



Figura 4.6. Decelerometru bidirecțional

Parametrul microscopic – Intervalul de timp între vehicule succesive (timpul intervehicular)

Intervalul de timp între vehicule succesive reprezintă perioada de timp (exprimată de regulă în secunde) care trece între două vehicule consecutive ce trec prin același punct de observație de pe drum. Practic, se măsoară timpul dintre momentul în care partea frontală a primului autovehicul trece de un reper fix (de exemplu, o linie imaginată trasată pe carosabil) și momentul în care partea frontală a autovehiculului următor trece prin același punct.

Timpul intervehicular este unul dintre cei mai folosiți parametri microscopici, pentru că reflectă distanțarea în timp dintre autovehicule, un indicator direct al densității traficului și al siguranței circulației.

Un timp intervehicular scurt sugerează un trafic dens, cu distanțe reduse între autovehicule, ceea ce poate crește riscul de coliziuni. În schimb, valori mari ale timpului intervehicular apar în trafic lejer, când conducătorii auto păstrează distanțe de siguranță mai mari.

În analiza traficului interurban, acest parametru este utilizat în evaluarea gradului de încărcare al arterelor rutiere, fiind în general obținut prin observații de trafic.

Înregistrarea datelor de trafic se face prin mai multe metode astfel:

- utilizarea factorului uman (operator) în colectarea datelor manual;
- utilizarea metodelor automate fixe sau mobile (radar).

În cazul înregistrării manuale există anumite aspecte care se pot dovedi a fi problematice în ceea ce privește acuratețea datelor înregistrate. Aceste aspecte depind și se referă strict la operatori:

- abilitățile operatorilor de a înregistra corespunzător toți participanții la trafic în intervalul de timp dat;
- sincronizarea între doi sau mai mulți operatori;
- volumul datelor de trafic, care poate fi uneori prea mare, astfel că operatorul va întârzia la notarea intervalului de timp.

În cazul înregistrărilor automate aspectele problematice sunt:

- corelarea timpului automatelor de înregistrare a fluxurilor de vehicule;
- descărcarea datelor din memoria aparatului.

Unele aparate automate de înregistrare nu au incluse în sistemul software opțiunea de calcul a acestui parametru microscopic, însă acesta poate fi determinat cu ajutorul ecuației:

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \quad (4.5)$$

unde: Δt_i - intervalul de succesiune între vehicule [s]

t_i - momentul de trecere a unui vehicul

t_{i-1} - momentul de trecere a unui vehicul anterior

Tehnici de conversie a datelor sunt pretabile, în funcție de instrumentele avute la dispoziție două metode de lucru:

- conversia în secunde - utilizată și la aparatele automate care generează direct acest parametru, utilizează baza de timp a sistemului de operare, acesta asigurând de altfel localizarea în timp a determinării. Astfel, conversia este simplă și constă în raportarea la „momentul zero”;
- zero referențial - se poate considera că momentul de început al monitorizării este momentul zero (într-un sistem de referință temporal relativ, arbitrar considerat), astfel că, din acest punct, pentru transformarea în secunde se poate aplica relația:

$$t_i = A_i \cdot 3600 + B_i \cdot 60 + C_i + \frac{D_i}{1000} \quad (4.6)$$

unde: A_i - ora momentului trecerii vehiculului

B_i - minutele corespunzătoare momentului trecerii vehiculului

C_i - secunde corespunzătoare momentului trecerii vehiculului

D_i - milisecunde corespunzătoare momentului trecerii vehiculului

Parametrul microscopic – Spațiul intervehicular (S_i)

Spațiul intervehicular (S_i) definește distanța de siguranță și relația directă dintre vehiculele care rulează unul după altul. Acesta este măsurat pe direcția axei drumului și exprimat, de regulă, în metri. Măsurarea spațiului intervehicular este utilizată la evaluarea riscurilor de coliziune, stabilirea capacității reale a unei benzi și pentru definirea regimurilor de circulație (liberă, congestie, blocaj).

Practic, spațiul intervehicular se determină ca distanță între punctul cel mai din spate al vehiculului precedent și punctul cel mai din față al vehiculului următor.

Această distanță poate varia semnificativ în funcție de

- viteză
- comportamentul conducătorilor auto
- condițiile de drum
- condițiile de trafic.

Spre exemplu, la viteze mari pe autostradă, conducătorii auto tind să mențină un spațiu intervehicular mai mare pentru a avea timp de reacție suficient.

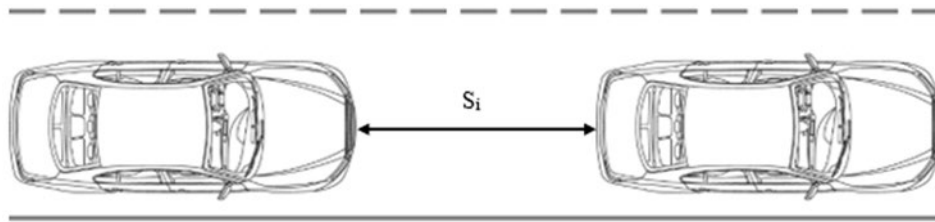


Figura 4.7. Marcarea spațiului intervehicular

Determinarea și monitorizarea spațiului intervehicular se poate realiza cu senzori radar, LiDAR, camere video cu procesare de imagine sau prin instrumente mobile instalate pe vehicule. Cunoașterea acestui parametru permite dezvoltarea și implementarea tehnologiilor moderne de asistență la conducere, cum ar fi Adaptive Cruise Control (ACC) sau sistemele automate de frânare de urgență (AEB).

4.2. Cinematica plutonului de vehicule și parametrii macroscopici ai traficului rutier

În analiza traficului rutier, pe lângă comportamentul individual al unui singur autovehicul, este necesar să se studieze și modul în care se deplasează un grup de autovehicule, denumit pluton de vehicule. Un pluton este un ansamblu de autovehicule care circulă într-o succesiune ordonată, pe aceeași bandă și cu viteze similare, păstrând spații și timpi intervehiculari relativ constanți. Din perspectiva traficului modern, comportamentul acestui pluton oferă informații valoroase pentru dimensionarea capacității drumurilor, estimarea congestiilor și stabilirea fluxurilor optime.

Analiza cinematica a plutonului se referă la studiul mișcării colective, viteza medie de deplasare, densitatea autovehiculelor, debitul și timpul de urmărire dintre conducători auto.

Debitul de vehicule (q) indică numărul de autovehicule care trec printr-o secțiune transversală a drumului pe unitatea de timp, exprimat în general în vehicule/oră. Debitul reflectă capacitatea efectivă a drumului și gradul de utilizare.

Densitatea traficului (k) reprezintă numărul de autovehicule pe unitatea de lungime a drumului, exprimată în general în vehicule/km. Aceasta arată cât de aglomerată este infrastructura rutieră într-un anumit moment.

Debitul de trafic (q) — indică numărul de autovehicule care trec printr-o secțiune transversală a drumului pe unitatea de timp, exprimat în vehicule/oră. Debitul reflectă capacitatea efectivă a drumului și gradul de utilizare.

Viteza medie (v sau v_{med}) caracterizează rapiditatea de deplasare a plutonului. Este calculată fie ca medie spațială (viteza medie pe un tronson fix), fie ca medie temporală (viteza medie măsurată într-un punct fix).

Acești parametri definesc parametrii macroscopici ai traficului rutier, spre deosebire de cei microscopici, care descriu comportamentul fiecărui autovehicul în parte. Parametrii macroscopici oferă o imagine de ansamblu asupra stării rețelei rutiere, fiind un pas important care trebuie parcurs pentru proiectarea infrastructurii și aplicarea măsurilor de management al traficului.

Cinematica plutonului mai implică și analiza coeziunii grupului: cum variază distanțele intervehiculare, cum apar unde de șoc în trafic (zone unde vehiculele frânează brusc și apoi accelerează) și cum influențează comportamentul de frânare și accelerare al unui conducător auto restul plutonului. Modelele matematice ale plutonului analizează formarea, disiparea și propagarea acestor unde de trafic.

Studiul cinematicii plutonului și determinarea parametrilor macroscopici permit:

- evaluarea gradului de congestie,
- planificarea semnalizării rutiere,
- estimarea capacității drumurilor,
- optimizarea fluxurilor prin semafoare inteligente sau benzi reversibile.

Parametrul macroscopic – Debit de vehicule

Debitul de vehicule, notat de regulă cu litera q , reprezintă numărul de autovehicule care trec printr-o secțiune transversală a drumului într-o unitate de timp. Cel mai frecvent se exprimă în vehicule pe oră (veh/h) sau vehicule pe minut (veh/min).

Debitul descrie volumul efectiv de trafic și stă la baza:

- calculului capacității drumurilor,
- analizei performanței rețelei rutiere,
- evaluării nivelului de serviciu (LOS — *Level of Service*),
- proiectării semnalizării și intersecțiilor semaforizate,
- stabilirii programelor de întreținere și modernizare a drumurilor.

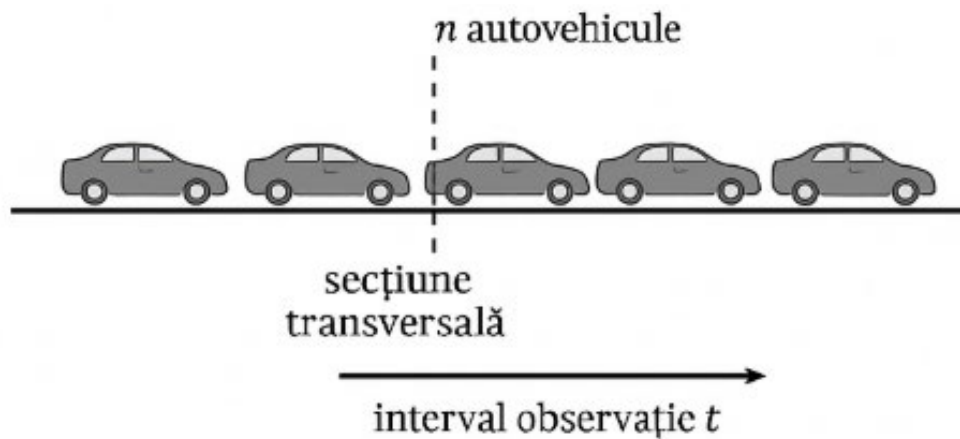


Figura 4.8. Schema explicativă a debitului

Debitul este un parametru dinamic, dependent de factori precum:

- cererea de trafic (numărul de vehicule care doresc să folosească drumul),
- capacitatea infrastructurii (numărul maxim de vehicule care pot trece pe oră, în condiții date),
- condițiile de rulare (limitări de viteză, condiții meteo, restricții de flux).

În practică, debitul se poate calcula direct din observații:

$$q = \frac{N}{T} \quad (4.7)$$

unde: N - numărul de autovehicule numărate,

T - intervalul de timp considerat [h].

De asemenea, dacă există un punct fix de observație, atunci:

$$q = \frac{3600}{h} \quad (4.8)$$

unde: h - timpul mediu între vehicule succesive [s]

Exemplu aplicativ: Pe un drum cu o bandă pe sens, s-au numărat 480 de autovehicule care au trecut printr-o secțiune în 30 de minute.

Calcul: $q = N/T = 480/0.5 = 960 \text{ veh/h}$

Parametrul macroscopic – Densitatea traficului

Densitatea traficului (k) exprimă numărul de autovehicule aflate simultan pe o unitate de lungime de drum, pe o bandă sau pe întreaga secțiune transversală și se măsoară în vehicule/km. Este o măsură statică care arată cât de aglomerat este drumul într-un moment dat. Aceasta se poate determina cu formula:

$$k = \frac{N}{L} \quad (4.9)$$

unde: N - numărul de autovehicule aflate pe segmentul de drum analizat

L - lungimea segmentului de drum (de obicei în km)

Densitatea arată gradul de ocupare al unui segment de drum într-un moment dat și exprimă raportul dintre numărul de autovehicule și lungimea drumului analizat. Practic, densitatea reflectă cât de „aglomerat” este carosabilul și influențează direct condițiile de circulație. O densitate mică indică un trafic rar, cu distanțe mari între autovehicule, ceea ce permite viteze mari și un flux de circulație liber, fluent. În schimb, o densitate mare semnalează un trafic compact, cu distanțe reduse între vehicule, ceea ce duce inevitabil la scăderea vitezei medii de deplasare și crește riscul de congestie și blocaje.

În practică, una dintre cele mai eficiente metode de a determina densitatea traficului este utilizarea imaginilor aeriene, captate cu ajutorul dronelor, al avioanelor ușoare sau al sateliților. Această tehnică oferă o perspectivă amplă și detaliată asupra unui segment de drum sau a unei intersecții, permițând numărarea rapidă și precisă a autovehiculelor pe o distanță definită, fără a fi nevoie de măsurători fizice directe la nivelul carosabilului.

Avantajul major al imaginilor aeriene este capacitatea de a obține informații în timp real, pe suprafețe mari, chiar și în condiții de trafic intens sau în zone greu accesibile pentru observatori la sol. De asemenea, prelucrarea digitală a imaginilor permite automatizarea numărării autovehiculelor și calculul densității, cu erori minime, reducând astfel timpul și costurile asociate colectării de date. Tehnicile moderne de procesare folosesc algoritmi de recunoaștere a formelor și inteligență artificială pentru a identifica vehiculele și a determina distanțele medii dintre ele, oferind o estimare exactă a densității (vehicule/km).

Din punct de vedere aplicativ, densitatea traficului este un parametru de bază pentru proiectarea infrastructurii rutiere și pentru evaluarea nivelului de serviciu pe un drum. Ea descrie cât de „aglomerat” este drumul într-un moment dat și ajută inginerii de trafic să stabilească limitele de viteză, capacitatea drumului și nevoia de măsuri suplimentare, cum ar fi lărgirea arterelor, semaforizarea inteligentă sau devierea fluxurilor prin rute alternative. De asemenea, densitatea este un indicator principal pentru modelarea relațiilor fundamentale dintre viteză, debit și spațiu disponibil, sprijinind prognozele și simulările utilizate în gestionarea traficului rutier.

Exemplu aplicativ: Pe un segment de 1 km dintr-o arteră urbană, la ora de vârf, se observă 35 de autovehicule în coloană continuă.

Calcul: $k = N/L = 35/1 = 35$ veh/km

Interpretare: O densitate de 35 veh/km indică un trafic urban relativ aglomerat, dar încă mobil.

Pentru comparație:

Densitate mică: 5–10 veh/km indică un flux liber.

Densitate medie: 20–40 veh/km indică un flux stabil.

Densitate mare: 50–70 veh/km indică un trafic cu congestie iminentă.

Parametrul macroscopic – Viteza medie

Viteza medie este cel de-al treilea parametru macroscopic al traficului rutier, fiind un indicator sintetic al calității și eficienței circulației pe un anumit sector de drum. Ea exprimă ritmul general de deplasare al fluxului de autovehicule și oferă o imagine de ansamblu asupra nivelului de serviciu pe tronsonul analizat. Viteza medie se calculează ca raport între distanța totală parcursă de toate vehiculele și timpul total consumat, iar în practică poate fi evaluată fie prin măsurători directe la fața locului, fie cu ajutorul tehnologiilor moderne de detecție, cum ar fi camere video, senzori inductivi sau GPS.

Determinarea vitezei medii este importantă pentru ingineria traficului, întrucât evidențiază cât de fluentă este deplasarea și cât de bine funcționează infrastructura rutieră raportat la cererea de trafic. Spre exemplu, o viteză medie ridicată, constantă, indică o circulație fluentă, fără obstacole sau factori perturbatori semnificativi, pe când o viteză medie scăzută sugerează existența unor factori restrictivi precum: intersecții aglomerate, semaforizări, lucrări în carosabil sau densități mari care provoacă încetiniri și opriri frecvente.

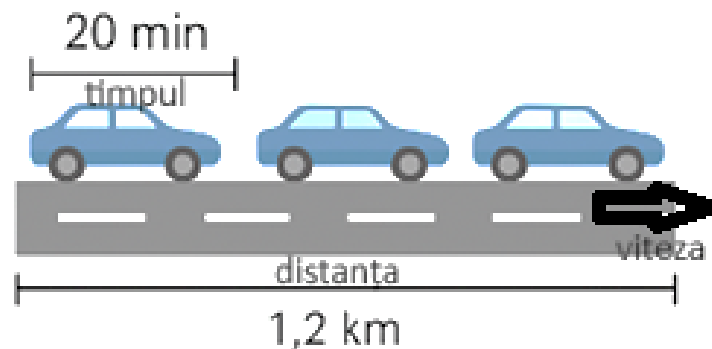


Figura 4.9. Schema explicativă a vitezei medii

Totodată, viteza medie este folosită împreună cu debitul și densitatea în relațiile fundamentale de trafic, servind la dimensionarea capacității drumurilor și la adoptarea măsurilor de management al traficului.

Viteza medie spațială se determină cu relația:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (4.10)$$

unde: d_i – distanța parcursă de vehiculul i [km]

t_i – timpul de deplasare al vehiculului i [h]

Exemplu aplicativ: Pe un tronson de drum de 2 km, 10 autovehicule sunt observate. Fiecare parcurge cei 2 km cu timpi mășurați astfel (în secunde):

160, 150, 155, 148, 165, 170, 158, 152, 149, 161.

Calcul - Timpul total consumat:

$$T = 160 + 150 + 155 + 148 + 165 + 170 + 158 + 152 + 149 + 161 = 1568 \text{ s}$$

Distanța totală parcursă:

$$D = 10 \times 2 = 20 \text{ km}$$

$$\text{Viteza medie: } \bar{v} = \frac{20}{\frac{1568}{3600}} = \frac{20}{0.4367} = 45.8 \text{ km/h}$$

Interpretare: Viteza medie de ~46 km/h indică un trafic fluid pe sectorul monitorizat, cu valori apropiate de viteza legală în oraș (dacă sectorul este urban).

O viteză medie stabilă arată o circulație coerentă, fără frânări bruște sau congestii majore. Dacă viteza medie ar scădea mult (ex. sub 25 km/h), ar semnala probleme de congestie, semaforizare deficitară sau lucrări în carosabil.

4.3. Relații și diagrame fundamentale între parametrii macroscopici ai traficului

Traficul rutier este un sistem complex, dinamic, influențat simultan de caracteristicile infrastructurii, comportamentul conducătorilor auto și particularitățile vehiculelor. Pentru a modela coerent acest sistem, inginerii de trafic utilizează un set de parametri macroscopici care descriu starea generală a fluxului de vehicule: debitul, densitatea și viteza medie.

Acești parametri nu acționează izolat, ci formează un triunghi conceptual interdependent. Modificarea unuia dintre ei conduce inevitabil la ajustări în valorile celorlalți doi. Înțelegerea acestor relații este esențială pentru proiectarea drumurilor, optimizarea intersecțiilor și evaluarea nivelului de serviciu.

Debitului (q) îi revine rolul de indicator al volumului de trafic. El reflectă câte vehicule traversează o secțiune de drum într-o unitate de timp, de obicei exprimată în vehicule pe oră (veh/h). Este principalul parametru de dimensionare și proiectare a rețelelor rutiere.

Densitatea (k) arată câți vehicule se află în medie pe un kilometru de drum la un moment dat. Ea evidențiază gradul de ocupare a suprafeței carosabile și are legătură directă cu confortul, siguranța și posibilitatea apariției congestiilor.

Viteza medie (v) exprimă viteza efectivă de deplasare a vehiculelor pe un tronson și reprezintă un indicator sintetic al calității circulației. Aceasta nu depinde exclusiv de caracteristicile geometrice ale drumului sau de limita legală de viteză, ci este rezultatul interacțiunii dintre numeroși factori. Printre cei mai importanți se numără intensitatea traficului (densitatea), comportamentul conducătorilor auto (stil de conducere, respectarea regulilor, reacția la situații neprevăzute), caracteristicile vehiculelor (putere, accelerație, dimensiuni), precum și condițiile externe, cum ar fi starea carosabilului, condițiile meteorologice, vizibilitatea sau prezența intersecțiilor și a semafoarelor.

Pe măsură ce densitatea traficului crește, viteza medie tinde să scadă din cauza reducerii distanțelor dintre vehicule și a creșterii frecvenței manevrelor de frânare și accelerare. În regim de trafic liber, viteza este determinată în principal de dorința conducătorilor auto și de constrângerile infrastructurii, însă în regim de trafic saturat sau congestionat, viteza devine un parametru impus de fluxul colectiv. Astfel, analiza vitezei medii permite identificarea pragurilor critice de funcționare ale unui tronson de drum și oferă informații pentru evaluarea nivelului de serviciu, estimarea timpilor de parcurs și fundamentarea măsurilor de management al traficului.

Relația dintre acești parametri este surprinsă în formula fundamentală a fluxului de trafic, care stabilește un echilibru matematic de bază, valabil pentru orice drum:

$$q = k \cdot v \quad (4.11)$$

unde: q – debitul de vehicule [veh/h]

k – densitatea traficului [veh/km]

v – viteza medie [km/h]

Interpretarea acestei formule arată clar că dacă viteza crește, pentru ca debitul să rămână constant, densitatea trebuie să scadă. Invers, dacă densitatea crește (mai multe vehicule pe km), viteza trebuie să scadă pentru a evita congestia. Când viteza și densitatea sunt optim echilibrate, debitul atinge valoarea maximă posibilă – așa-numita capacitate de trafic.

Pentru a înțelege vizual aceste interdependențe, se folosesc diagramele fundamentale:

- Diagrama Debit–Densitate ($q-k$) arată cum variază debitul în funcție de gradul de ocupare al drumului.
- Diagrama Debit–Viteză ($q-v$) arată cum influențează viteza debitul traficului.
- Diagrama Viteză–Densitate ($v-k$) arată relația inversă directă dintre viteză și densitate.

În figura 4.11, în primul cadran, se observă corelarea densității cu debitul fluxului de vehicule, unde k_{opt} reprezintă densitatea optimă a fluxului de vehicule, iar q_{max} reprezintă valoarea maximă a debitului.

Viteza fluxului liber reprezintă acea valoare a vitezei în timpul căreia debitul fluxului de vehicule și densitatea tind către zero. Densitatea în condiții de congestie are loc în momentul în care, atât debitul cât și viteza tind către valori minime.

Dacă atât debitul, cât și viteza tind către zero, se poate aprecia faptul că traficul este instabil.

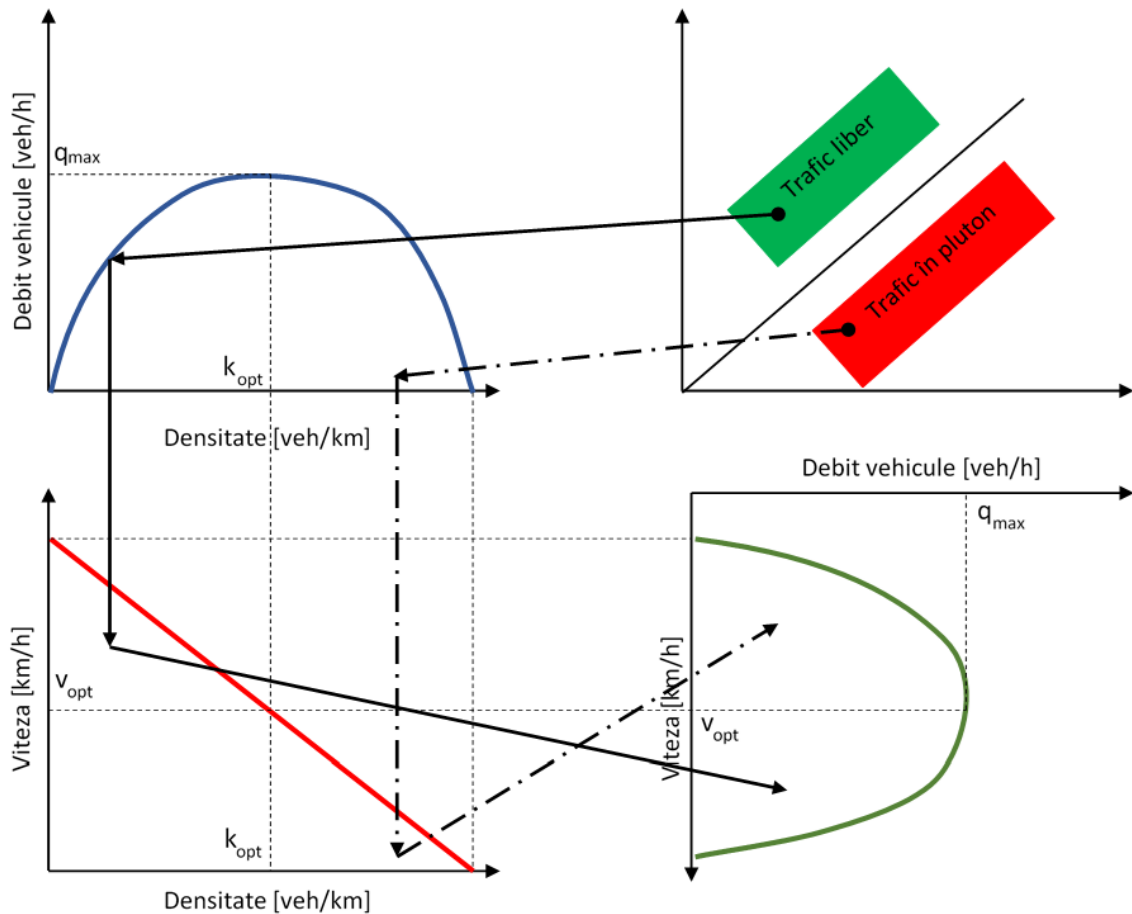


Figura 4.10. Diagrama fundamentală a traficului rutier

Ca urmare a cercetărilor experimentale, au fost evidențiate o serie de modele de corelări între debitul fluxului de vehicule și viteza spațială.

Modelul Drew

Modelul Drew este unul dintre cele mai utilizate modele empirice pentru a descrie relația inversă dintre viteza de deplasare a vehiculelor și densitatea traficului. Drew prezintă diagrama fundamentală a fluxului de trafic, evidențiind faptul că viteza medie scade progresiv

odată cu creșterea densității, până la atingerea densității de blocaj.²² Astfel, modelul evidențiază cum viteza reală tinde către zero odată cu apropierea de densitatea maximă admisă (densitatea de congestie).

Prin forma sa matematică, Modelul Drew ajută la estimarea vitezei efective pentru orice combinație de densitate și viteză a fluxului liber. Acesta este util în proiectarea drumurilor, dimensionarea capacității și evaluarea riscului de congestie pe sectoarele rutiere intens circulate.

Rezultatele modelului sunt folosite pentru scenarii de simulare și optimizare a rețelelor de transport rutier.

$$v = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right)^{0,5} \quad (4.12)$$

unde:

v – viteza [km/h]

v_f – viteza fluxului liber [km/h]

k – densitatea [veh/km]

k_j – densitatea în condiții de congestie [veh/km]

Modelul Greenberg

Modelul Greenberg descrie relația viteză–densitate printr-o funcție logaritmică, fiind adecvat în special pentru regimuri de trafic caracterizate prin densități ridicate și apropierea de capacitatea maximă a secțiunii de drum. Conform acestui model, viteza medie scade logaritmic pe măsură ce densitatea se apropie de densitatea de blocaj, ceea ce reflectă comportamentul fluxurilor de trafic în condiții de congestie.²³ Această abordare reflectă mai fidel comportamentul real al conducătorilor auto în medii aglomerate, unde variațiile mici de spațiu pot genera schimbări semnificative de viteză.

Modelul Greenberg este folosit în analize de trafic pentru a evalua cum reacționează fluxurile de vehicule atunci când infrastructura este exploatată la maximum. Datorită formei sale, acest model permite estimarea pragurilor critice la care un drum atinge saturația, fiind un instrument pentru planificarea semaforizării și a managementului traficului urban.

$$v = v_{med} \ln \left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (4.13)$$

unde:

v – viteza [km/h]

v_{med} – viteza medie [km/h]

k – densitatea [veh/km]

k_j – densitatea în condiții de congestie [veh/km]

²² Donald R. Drew, *Traffic Flow Theory and Control*, New York, McGraw-Hill, 1968, p.45–50.

²³ Greenberg, H. 1959. „An Analysis of Traffic Flow.” *Operations Research* 7 (1): p.79–85.

Modelul Underwood

Modelul Underwood propune o relație exponențială între viteza de deplasare și densitatea traficului, indicând o scădere treptată, dar accelerată a vitezei pe măsură ce densitatea crește. Acesta are la bază ipoteza că viteza fluxului liber descrește exponențial atunci când interacțiunile dintre vehicule devin semnificative.²⁴ Modelul este considerat unul dintre cele mai elegante din punct de vedere teoretic, având o expresie matematică simplă și aplicabilă în numeroase simulări de trafic.

Prin forma sa, Modelul Underwood permite estimarea vitezei medii pe tronsoane cu trafic variabil și oferă o bază solidă pentru modelarea scenariilor de mobilitate pe autostrăzi, drumuri expres și căi rapide. Este preferat de planificatorii urbani pentru studiile de capacitate și pentru calibrarea software-urilor de simulare din domeniul transporturilor.

$$v = v_f \cdot e^{\left(-\frac{k}{k_{med}}\right)} \quad (4.14)$$

unde:

v – viteza [km/h]

v_f – viteza fluxului liber [km/h]

k – densitatea [veh/km]

k_{med} – densitatea medie corespunzătoare vitezei optime [veh/km]

Modelul May

Modelul May dezvoltă ideea relației exponențiale, introducând un factor de corecție de tip pătrat pentru raportul dintre densitate și o densitate medie optimă. Prin această abordare, modelul surprinde mai bine efectul de congestie severă asupra vitezei, arătând că, pe măsură ce densitatea se apropie de un nivel critic, viteza se reduce mai rapid decât în modelul Underwood.²⁵ Această descriere matematică ajută la înțelegerea comportamentului non-linear al fluxurilor de vehicule în condiții de saturație.

Modelul May este utilizat frecvent pentru calibrarea curbelor de trafic în simulări realiste, mai ales pe drumuri cu profil mixt sau cu variații frecvente de densitate. Datorită formei sale, el oferă o estimare mai conservatoare a vitezei, fiind preferat în studii care vizează analiza riscurilor de blocaj și impactul asupra mobilității urbane.

$$v = v_f \cdot e^{\left(-0,5\left(\frac{k}{k_{med}}\right)^2\right)} \quad (4.15)$$

²⁴ R. T. Underwood, *Speed, Volume, and Density Relationships: Quality and Theory of Traffic Flow*, New Haven, Yale Bureau of Highway Traffic, 1961, p.140-142.

²⁵ A. D. May, *Traffic Flow Fundamentals*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1965, p.66–68.

unde: v – viteza [km/h]

v_f – viteza fluxului liber [km/h]

k – densitatea [veh/km]

k_{med} – densitatea medie corespunzătoare vitezei optime [veh/km]

În urma analizei modelelor se constată faptul că relația debit – densitate este de tip exponențial, la fel ca și relația dintre viteză și debit. Relația dintre densitate și viteză este de tip liniar.

În practică, diagramele fundamentale viteza–densitate, debit–densitate și debit–viteză reprezintă instrumente esențiale pentru inginerii de trafic și factorii de decizie implicați în proiectarea, evaluarea și optimizarea rețelelor de drumuri. Aceste diagrame transformă datele brute colectate din teren în informații cuantificabile, care reflectă în mod direct comportamentul colectiv al conducătorilor auto și modul în care aceștia interacționează cu infrastructura rutieră disponibilă.

De exemplu, punctele de pe diagrama viteza–densitate indică starea de funcționare a unui segment rutier într-un anumit moment. Un punct situat în zona din stânga jos, cu densitate redusă și viteză mare, caracterizează un trafic liber, în care fluxul de autovehicule se deplasează cu viteza de regim, fără interferențe semnificative între vehicule. Pe măsură ce numărul de vehicule crește, punctele se deplasează spre dreapta diagramei, densitatea se intensifică, iar viteza medie scade, evidențiind tranziția către un regim de circulație cu restricții și interacțiuni tot mai intense între vehicule.

În zona critică a diagramei, în apropierea densității de congestie, orice creștere marginală a densității conduce la o scădere drastică a vitezei, iar fluxul rutier devine instabil. Această zonă este esențială pentru evaluarea pragurilor de capacitate și pentru definirea strategiilor de intervenție: limitarea accesului, implementarea benzilor reversibile, utilizarea semaforizării inteligente sau adoptarea măsurilor de calmare a traficului.

Pe diagrama debit–densitate, se evidențiază punctul de debit maxim, cunoscut drept capacitatea teoretică a drumului. Acesta marchează densitatea critică la care fluxul de autovehicule atinge valoarea maximă posibilă fără a intra în congestie. Orice depășire a acestei densități conduce la reducerea debitului, deși, paradoxal, mai multe vehicule sunt prezente pe segment. Această relație contrară stă la baza fenomenului de blocaj rutier.

De asemenea, relația debit–viteză oferă o perspectivă complementară: la viteze reduse (regim congestionat), debitul poate scădea substanțial, deoarece viteza de deplasare scade mai repede decât crește densitatea. În regim liber, viteza mare asigură un debit semnificativ, însă doar până la punctul optim unde densitatea susține un flux constant fără a limita viteza de deplasare.

În concluzie, aceste diagrame nu sunt doar simple reprezentări grafice, ci constituie o bază științifică pentru modelarea matematică a circulației și prognoza comportamentului traficului. Fără interpretarea corectă a acestor relații, orice strategie de dezvoltare a infrastructurii rutiere riscă să fie inefficientă, indiferent de investițiile realizate.

Mai mult, aceste relații fundamentale permit inginerilor de trafic să dimensioneze intersecțiile, să stabilească timpii optimi de semaforizare, să proiecteze profilele de drum și să adapteze infrastructura la cerințele dinamice ale mobilității urbane sau interurbane. Astfel, relațiile dintre parametrii macroscopici: debit, densitate și viteză, reprezintă coloana vertebrală a teoriei moderne a traficului rutier.

Dincolo de calculele teoretice, validarea practică a acestor relații este realizată prin monitorizarea continuă a traficului folosind tehnologii avansate: camere de supraveghere, senzori inductivi, radare și sisteme inteligente de transport. Aceste date sunt prelucrate pentru calibrarea modelelor matematice și pentru ajustarea continuă a strategiilor de management al fluxurilor de vehicule.

În concluzie, relațiile fundamentale dintre parametrii macroscopici oferă instrumente clare pentru diagnoza și prognoza comportamentului fluxurilor de vehicule. Orice decizie de optimizare a infrastructurii trebuie să țină cont de aceste relații pentru a asigura siguranța, fluenta și eficiența mobilității. Corelarea coerentă între debit, densitate și viteză devine astfel un indicator direct al performanței rețelelor rutiere și un ghid indispensabil pentru planificarea dezvoltării urbane moderne.

4.4. Analiza Origine – Destinație și integrarea în modelele macroscopice de trafic

Analiza Origine–Destinație (OD) reprezintă este un instrument al inginerilor de trafic care are rolul de a descrie modul în care conducătorii auto utilizează infrastructura rutieră, care sunt motivele deplasării și cum se distribuie fluxurile de autovehicule între diverse zone geografice. Esența acestei analize constă în identificarea punctului de plecare (origine) și a punctului de sosire (destinație) pentru fiecare deplasare, în scopul de a construi modele de prognoză a cererii de transport, de a dimensiona capacitățile rețelei și de a fundamenta deciziile privind investițiile în infrastructură.

Informațiile privind fluxurile OD sunt indispensabile atât la nivel strategic, în proiectarea rețelelor de drumuri, planificarea dezvoltării urbane și a centurilor de ocolire, cât și la nivel tactic și operațional, pentru gestionarea traficului zilnic, optimizarea rutelor și dimensionarea parcajelor. În România, metodologiile standard de colectare și prelucrare a

datelor OD sunt detaliate în diverse buletine tehnice și norme emise de CNAIR și CESTRIN, principalele instituții responsabile cu monitorizarea și analiza circulației rutiere.

Procesul de analiză OD

Conform metodologiei efectuării anchetelor de circulație rutieră, anchetele OD se realizează pe secțiuni reprezentative ale drumurilor naționale, în puncte selectate astfel încât să acopere principalele axe de circulație.²⁶

Anchetele presupun oprirea vehiculelor în puncte special amenajate, unde anchetatorii autorizați solicită conducătorilor auto informații relevante, precum locul de plecare, destinația finală, scopul călătoriei, numărul de pasageri, tipul de marfă transportată și ruta estimată.

Amplasarea anchetatorilor OD respectă reguli stricte pentru siguranța participanților la trafic și eficiența colectării datelor. De regulă, punctele de staționare sunt stabilite pe zone cu vizibilitate bună, pe drumuri cu un flux de circulație care permite oprirea vehiculelor fără a perturba semnificativ traficul.

De asemenea, se utilizează panouri de presemnalizare și bariere de ghidare, conform instrucțiunilor de staționare și organizare a posturilor de anchetă.²⁷

Detaliat, o schema tipică pentru o ancheta OD pe un drum național sau județean conține următoarele etape:

1. Alegerea punctului de anchetă

- Se selectează o secțiune reprezentativă pe drumul studiat: de regulă, la intrarea/ieșirea dintr-o localitate, la un nod rutier important sau pe un drum de tranzit.
- Se caută un loc unde autovehiculele pot fi încetinite sau oprite în siguranță (ex: parcare laterală, refugiu, zonă amenajată).

2. Organizarea punctului de anchetă

- Se marchează două benzi:
 - Banda de deviere: semnalizată cu conuri/indicatoare, unde vehiculele sunt deviate pentru interviu.
 - Banda de circulație normală: traficul care nu poate fi oprit continuă să circule normal.
- Se amplasează panouri de presemnalizare cu 500 m înainte: avertizează conducătorii auto că urmează anchetă OD.

²⁶ CESTRIN, *Buletin Tehnic nr. 312/2017 – Metodologia efectuării anchetelor de circulație rutieră*, București, CESTRIN, 2017, p.5–14.

²⁷ CNAIR, *Instrucțiuni tehnice privind staționarea pentru anchete de circulație (Buletin Tehnic nr. 289/2015)*, București, CNAIR, 2015, p.4–9.

3. Poziționarea echipei de anchetă

- Șeful punctului de anchetă: coordonează și monitorizează fluxul.
- Intervievatorii: staționează pe banda de deviere, fiecare dotat cu formulare OD (tipărite sau digitale).
- Agenți de dirijare/polițiști: asigură fluența și siguranța. Opresc vehiculele, direcționează spre zona de interviu.
- Eventual: personal de monitorizare video.

4. Date colectate

Pentru fiecare vehicul oprit se colectează următoarele date²⁸:

- punctul de origine (localitate de plecare),
- punctul de destinație (localitate de sosire),
- scopul călătoriei (personal, marfă, serviciu, turism etc.),
- categoria vehiculului,
- numărul de ocupanți,
- intervalul orar,
- eventual: observații despre ruta aleasă.

5. Fluxul de operare

- Interviul durează max. 1–2 minute.
- Datele se notează în fișe OD, pe categorii de vehicule.
- După interviu, vehiculul revine pe banda de circulație.

6. Durata anchetei

- O anchetă OD durează de obicei 12–24 ore, pentru a surprinde toată variația diurnă.
- Se recomandă repetarea în mai multe zile și anotimpuri, pentru calibrare statistică.

Date colectate și prelucrarea lor

Datele brute obținute sunt centralizate în matrice OD, care prezintă distribuția deplasărilor între toate perechile de zone studiate. O matrice OD conține pe linii zonele de origine și pe coloane zonele de destinație, celulele indicând numărul de deplasări corespunzător fiecărei perechi.

Pe baza datelor, se pot calcula fluxurile estimate prin modele gravitaționale pentru fiecare traseu principal, utilizând relația generală:

$$T_{ij} = P_i \cdot A_j \cdot f(C_{ij}) \quad (4.16)$$

²⁸ CESTRIN, *Buletin Tehnic BT 02/2015*, București: CESTRIN, 2015, p.10–18.

unde: T_{ij} - numărul de deplasări de la zona i la zona j ,

P_i - populația / atractorul de origine,

A_j - factorul de atractivitate al destinației,

$f(C_{ij})$ - funcția de rezistență generalizată (de regulă, o funcție care descrește odată cu creșterea costului / timpului de deplasare între i și j).

Aceste relații sunt adaptate și calibrate în modelele macroscopice de trafic, fiind integrate în instrumente de simulare care permit evaluarea diverselor scenarii de dezvoltare urbană sau rutieră.

Unitate: număr deplasări / zi

Interpretare: rând = ORIGINE, coloană = DESTINAȚIE

Diagonala = 0 (nu se consideră deplasări interne)

Tabelul 4.1. Exemplu matrice OD

Origine \ Destinație	Cluj	Turda	Alba Iulia	Aiud	Tg. Mureș	Dej	Zalău	Bistrița	Sibiu	Mediaș
Cluj-Napoca	0	1850	620	410	980	760	540	390	450	360
Turda	1720	0	510	380	740	420	310	220	330	260
Alba Iulia	640	520	0	690	460	180	140	120	610	480
Aiud	430	390	720	0	350	160	130	110	420	310
Târgu Mureș	960	710	450	330	0	290	210	260	340	390
Dej	780	430	190	170	310	0	260	410	210	180
Zalău	560	320	150	140	220	270	0	180	160	140
Bistrița	410	230	130	120	280	420	190	0	170	200
Sibiu	470	340	630	440	360	220	170	160	0	820
Mediaș	380	270	490	320	410	190	150	210	790	0

Tabelul reprezintă o matrice origine–destinație construită cu valori fictive, utilizată în scop didactic pentru ilustrarea distribuției fluxurilor de deplasare între orașe aflate în proximitate geografică. Valorile exprimă numărul estimat de deplasări zilnice între perechi origine–destinație.

Integrarea în modelele macroscopice

Matricea Origine - Destinație reprezintă setul de date utilizat pentru modelele de trafic de tip *4-stage model* (modelul clasic cu patru etape: generarea cererii, distribuția deplasărilor, alegerea modului de transport și alocarea pe rețea). Astfel, datele OD furnizează baza pentru calculul fluxurilor pe drumuri, evaluarea nivelului de serviciu și identificarea sectoarelor cu risc de congestie.

Matricea OD este o reprezentare tabelară care arată câte deplasări se efectuează între fiecare pereche de zone de origine și destinație într-o unitate de timp (de obicei 24h, interval orar de vârf sau pe segmente orare).

Fiecare element T_{ij} arată numărul de autovehicule care pleacă din zona i și ajung în zona j . Această matrice este punctul de plecare al oricărui model de trafic de scară mare, pentru că reflectă cererea reală de mobilitate.

Modelul clasic cu patru etape – 4 Stage Model

Acest model împarte procesul de modelare a traficului în patru pași logici, integrați secvențial:

Etapa 1: Generarea cererii de deplasare (Trip Generation)

- Se determină numărul total de deplasări generate într-o zonă de origine, respectiv atrase într-o zonă de destinație.
- Factorii: populație, locuri de muncă, funcțiunea urbană, densitatea, venituri, atractivitate economică.

Etapa 2: Distribuția deplasărilor (*Trip Distribution*)

- Se stabilește legătura între zone – câte deplasări se efectuează de la fiecare origine la fiecare destinație.
- Se întocmește matricea OD, fie prin ancheta detaliată mai sus, fie estimată prin modele gravitaționale (Relația 4.16)

Etapa 3: Alegerea modului de transport (*Mode Choice*)

- Se împarte cererea O–D pe moduri de transport: auto personal, transport public, bicicletă, mers pe jos.
- Se aplică funcții de utilitate și preferințe comportamentale.

Etapa 4: Alocarea fluxurilor pe rețea (*Traffic Assignment*)

- Fluxurile de trafic se distribuie pe rețeaua de drumuri, conform principiului drumului cu cost minim și interacțiunii dintre cerere și capacitate.
- Rezultatul este reprezentat de volume pe segmente, viteze, timp de parcurs, niveluri de serviciu.

Datele OD se leagă cu modelul astfel:

- În distribuție: determină legăturile între zone.
- În alegerea modului: arată câte deplasări vor folosi auto, transport public etc.
- În alocare: fiecare pereche O–D devine un flux pe rețea, rutat pe trasee posibile.

Exemplu aplicativ: Dacă între zona rezidențială A și zona industrială B se estimează 500 deplasări OD în ora de vârf, iar 80% folosesc auto personal, atunci 400 vehicule vor fi rutate între A și B, fiind repartizate pe trasee posibile (ex: DN, variante ocolitoare).

Integrarea matricei OD în modelele macroscopice de trafic reprezintă fundamentul practic al planificării rutiere moderne. Odată inclusă în procesul de modelare, matricea OD permite calculul detaliat al fluxurilor de vehicule pe fiecare segment rutier, ajutând la evaluarea nivelurilor de serviciu pentru drumurile principale și la identificarea rapidă a punctelor de congestie sau a sectoarelor critice unde capacitatea infrastructurii este depășită.

Prin intermediul acestor date, se pot fundamenta scenarii de modernizare a rețelei, de la proiectarea unor noi sensuri giratorii, pasaje denivelate și lărgiri de sectoare, până la optimizarea semaforizării și a prioritizării traficului.

Mai mult, integrarea datelor OD permite testarea variantelor de organizare a fluxurilor: de exemplu, se poate simula impactul deschiderii unei rute alternative sau al restricționării traficului pe anumite artere în intervale de vârf.

Fără matricea OD, modelele de trafic ar rămâne simple construcții teoretice, lipsite de legătură cu realitatea din teren. Anchetele OD validează datele generate de simulări și asigură calibrarea continuă a modelelor, astfel încât prognozele să reflecte evoluția reală a comportamentului de mobilitate, apariția de noi zone urbane, modificările funcționale sau creșterea parcului auto.

Prin urmare, matricea OD nu doar susține diagnosticul rețelei rutiere actuale, ci permite și dezvoltarea scenariilor viitoare, asigurând premisele pentru o planificare coerentă, sustenabilă și sigură a mobilității urbane și regionale.

Matricele origine–destinație se actualizează la intervale de 5–10 ani și sunt validate prin corelarea cu numărători automate de trafic și date obținute din sisteme de detecție video, conform metodologiei CESTRIN.²⁹

4.5.Principii și metode de calcul ale capacității de trafic pentru arterele rutiere urbane

Capacitatea de trafic a unei artere urbane este definită ca volumul maxim de autovehicule care pot trece în condiții de siguranță și confort, pe o bandă sau pe întreaga secțiune transversală, într-o perioadă de timp determinată, de regulă o oră, în condițiile în care viteza de deplasare nu scade sub o limită acceptabilă. Această definiție subliniază că nu există o capacitate absolută, ci o valoare dependentă de context și de standardele de calitate a serviciului.

²⁹ CESTRIN, *Buletin Tehnic BT 01/2016*, București: CESTRIN, 2016, p.15–21.

Standardul STAS 10144/5-89 indică valori orientative ale capacității teoretice de circulație pe bandă, corelate cu lățimea acesteia și cu regimul de viteză.³⁰ De exemplu, o bandă urbană de 3,5 m lățime, cu circulație liberă și fără întreruperi semnificative, poate avea o capacitate de bază de 1800–2000 vehicule/oră/bandă. Capacitatea scade semnificativ în prezența factorilor perturbatori.

Condițiile reale de exploatare reduc capacitatea de bază. Astfel, se aplică coeficienți de corecție pentru:

- Geometrie: pante longitudinale, curbe de rază mică.
- Trafic pietonal: treceri de pietoni frecvent traversate, zone comerciale.
- Intersecții: tipul de control (semaforizat sau nu), timpii de verde/roșu.
- Stații de transport public: stații fără alveole care obligă autovehiculele să depășească autobuzele pe aceeași bandă.
- Comportament rutier: disciplină redusă, opriri/staționări neregulate, conducători auto agresivi.

În zonele urbane, intersecțiile semaforizate reprezintă principalul factor de limitare a capacității. Timpul de verde efectiv, raportul dintre timpii de verde și roșu și sincronizarea semafoarelor sunt parametri critici. STAS 10144/5-89 recomandă ajustarea capacității liniare cu un factor de debit de saturație, calculat în funcție de timpii semaforului și de fluxurile conflictuale.

Compoziția traficului influențează semnificativ capacitatea. Vehiculele grele (camioane, autobuze) ocupă mai mult spațiu și necesită mai mult timp pentru accelerație/decelerație, reducând astfel debitul efectiv. Pentru a ține cont de acest lucru, capacitatea se exprimă adesea în unități de autoturism echivalent (PCU – *Passenger Car Units*).

În mediul urban, factorii perturbatori sunt multipli și interacționează: stații de transport public, piste de biciclete, treceri de pietoni frecvente și lipsa spațiului de manevră generează o capacitate variabilă pe segmente scurte. În practică, capacitatea este adesea mai mică decât cea calculată teoretic, necesitând ajustări dinamice.

Calculul capacității este strâns legat de conceptul de nivel de serviciu (Level of Service - LOS). Acesta clasifică calitatea circulației de la A (flux liber) la F (blocaj total), în funcție de viteza medie, densitate și timpul de întârziere. Proiectarea modernă urmărește asigurarea unui nivel de serviciu C sau D pe arterele urbane principale.

³⁰ ASRO, *STAS 10144/5-89 – Capacitatea de circulație a drumurilor. Metode de calcul*, București: ASRO, 1989, p.7–9.

Determinarea capacității este baza pentru dimensionarea drumurilor, evaluarea scenariilor de extindere a infrastructurii, proiectarea intersecțiilor giratorii sau semaforizate, calculul benzii suplimentare sau delimitarea benzilor dedicate transportului public.

Capacitatea de trafic nu este un parametru fix, ci unul dinamic. Modificările fluxurilor, apariția rutelor alternative, introducerea unor restricții noi sau modificările de regim de parcare impun recalculări periodice pentru menținerea siguranței și fluenței circulației.

Deși STAS 10144/5-89 rămâne referința de bază, practicile actuale completează acest standard cu metode avansate de simulare (ex.: software de micro și macro simulare) și cu recomandările din *Highway Capacity Manual* sau Manualul de Proiectare Rutieră CNAIR (unde există instrucțiuni complementare). Astfel, proiectanții își calibrează calculele la realitățile actuale ale traficului urban.

Așadar, capacitatea se raportează întotdeauna la tranzitul continuu, deci intersecțiile sau obstacolele trebuie considerate prin factori de reducere. În zonele urbane, capacitatea este limitată nu doar de secțiunile liniare, ci și de capacitatea intersecțiilor, care de multe ori devine veriga slabă, iar regimul de circulație (priorități, restricții, benzi rezervate transportului public) poate modifica radical valorile practice.

Parametrii de calcul pentru determinarea capacității de circulație sunt:

Fluența circulației este un coeficient de evaluare a calității acesteia, în funcție de tipul de participant la trafic.

$$F = \frac{v}{v_B} = 0 \dots 1 \quad (4.17)$$

unde: v – viteza medie de trafic pe artera analizată [km/h]

v_B – viteza de proiectare a arterei [km/h]

În funcție de valorile coeficientului F , fluența circulației se apreciază astfel:

- 1 ... 0,5 – foarte bună
- 0,5 ... 0,3 – bună
- 0,15 ... 0,3 – redusă
- sub 0,15 – foarte redusă

Interspațiul de succesiune reprezintă intervalul dintre două vehicule succesive, pe aceeași direcție de deplasare.

$$i = \frac{1000 \cdot v}{3600} \quad (4.18)$$

Interspațiul minim de succesiune corespunde distanței minime necesare pentru oprirea vehiculelor în palier.

$$i_{min} = \frac{v^2}{26 \cdot g \cdot f} + \frac{v}{3,6} \cdot t + S \quad (4.19)$$

unde: f – coeficientul de frecare la frânare

S – spațiul de siguranță [m]

t – timp percepție-reacție [s]

Tabelul 4.2. Valorile parametrilor de calcul adoptați

Tipul traficului	Valori medii pentru:			
	Viteza medie, v [km/h]	Coeficientul de frecare la frânare, f	Timp percepție-reacție, t, [s]	Spațiul de siguranță [m]
Cu viteza curentă	20 ... 60	0,30 ... 0,45	0,5 ... 1,5	5 ... 7
Cu viteza redusă	5 ... 20	0,28 ... 0,4	1,5 ... 2,5	10 ... 20

Densitatea traficului se exprimă în vehicule/km.

$$D = \frac{1000}{i} \quad (4.20)$$

Capacitatea de circulație a unei benzi carosabile este de două tipuri:

➤ Pentru flux continuu [veh/h] :

$$N^{(c)} = \frac{1000 \cdot v}{i_{min}} \quad (4.21)$$

➤ Pentru flux discontinuu [veh/h]:

$$N^{(d)} = K \cdot N^{(c)} \quad (4.22)$$

unde: K – coeficientul de discontinuitate

Coeficientul de discontinuitate se află cu ajutorul relației:

$$K = \frac{\frac{A}{v}}{\frac{A}{v} + \frac{v}{2} \left(\frac{1}{w_a} + \frac{1}{w_f} \right) + T_r} \quad (4.23)$$

unde: w_a – accelerația autovehiculelor în flux discontinuu [m/s^2]

w_f – decelerația autovehiculelor [m/s^2]

T_r – timpul de așteptare la intrarea în intersecții [s]

A – distanța dintre intersecții [m]

Numărul benzilor de circulație pe un sens:

$$n = \sum_i \frac{P_i}{N \cdot C} + K_1 + K_2 \quad (4.24)$$

unde: P_i – intensitatea orară a traficului pe sensul i

N – capacitatea de circulație normată

K_1 – coeficientul dat de frecvența transportului în comun:

$K_1 = 0$ dacă frecvența este redusă și $K_1 = 1$ dacă frecvența este de peste 60 veh/h

K_2 – coeficientul rampei: la valori sub 4% = 0, peste 4% = 1

C – coeficient de corecție dat de lățimea străzii (se adoptă)

Tabelul 4.3. Coeficienții de corecție

Lățimea benzii [m]	Coeficient de corecție	
	Străzi cu 2 benzi	Străzi cu mai mult de 2 benzi
3,50	1	1
3,25	0,90	0,95
3,00	0,80	0,90
2,75	0,70	0,80

5. Măsuri de calmare a traficului rutier

În contextul creșterii continue a mobilității urbane și al diversificării participanților la trafic, conceptele moderne de planificare și proiectare rutieră integrează tot mai frecvent măsuri destinate calmării traficului (*traffic calming*). Acestea reprezintă un ansamblu de intervenții tehnico-urbanistice menite să reducă viteza de deplasare a vehiculelor motorizate, să crească nivelul de siguranță rutieră, să diminueze impactul negativ asupra mediului urban și să îmbunătățească calitatea vieții locuitorilor.

Calmarea traficului este o strategie în managementul mobilității durabile, utilizată preponderent în zonele urbane rezidențiale, în preajma unităților de învățământ, în centrele istorice și în zonele cu prezență intensă a pietonilor sau a bicicliștilor. Aplicarea acestor măsuri se face printr-o abordare integrată care include amenajări fizice, reglementări de viteză, elemente de semnalizare, dar și intervenții urbanistice care încurajează utilizarea modurilor nemotorizate de deplasare.

Principalele obiective ale acestor măsuri sunt: creșterea siguranței tuturor participanților la trafic (în special a celor vulnerabili), prevenirea accidentelor rutiere prin reducerea vitezelor, creșterea predictibilității comportamentului rutier și descurajarea utilizării abuzive a arterelor secundare ca rute de tranzit (*rat running*). În acest sens, calmarea traficului devine nu doar un instrument tehnic, ci și unul social, contribuind la coeziunea urbană și la percepția de siguranță.

Elementele de calmare a traficului pot fi clasificate în mai multe categorii, în funcție de natura intervenției: amenajări verticale (ridicături de carosabil), restricții geometrice (gâturi de îngustare, refugii mediane), reconfigurări ale intersecțiilor (sensuri giratorii miniaturale), modificări de suprafață (pavaje tactile, benzi acustice), și măsuri vizuale și simbolice (spații verzi, mobilier urban, culoare, textură).

Aplicarea acestor măsuri nu este arbitrară, ci se bazează pe date obiective privind comportamentul rutier, analiza fluxurilor, monitorizarea accidentelor și observații directe privind interacțiunea dintre diferiți utilizatori ai drumului. În practică, calmarea traficului este precedată de o etapă complexă de diagnostic, în care se utilizează metode precum analiza vitezelor punctuale și de parcurs, numărătorile automate, anchetele de trafic și evaluările calitative ale riscurilor.

Pe plan internațional, ghidurile de bune practici elaborate de organisme precum National Association of City Transportation Officials (NACTO), FHWA (SUA), PIARC sau TRB, recomandă un mix flexibil de măsuri adaptate specificului local. În România, elementele de calmare a traficului sunt reglementate prin standarde tehnice, normative de proiectare și

documentații de urbanism, fiind totodată susținute prin finanțări europene destinate mobilității urbane sustenabile.³¹

Un aspect în proiectarea acestor măsuri este compatibilitatea lor cu cerințele de accesibilitate pentru vehiculele de intervenție (pompieri, ambulanțe), transportul public și persoanele cu dizabilități. De asemenea, orice intervenție trebuie să respecte principiul „siguranței pasive”, adică în cazul în care impactul cu obstacolul este inevitabil, acesta să nu amplifice gravitatea accidentului.

Deși unele măsuri de calmare a traficului pot genera temporar nemulțumiri în rândul conducătorilor auto (datorită timpilor de parcurs mai mari sau senzației de disconfort), studiile longitudinale demonstrează că beneficiile cumulative – reducerea accidentelor, îmbunătățirea calității aerului, revalorizarea spațiului public – sunt net superioare inconveniențelor inițiale.

Nu în ultimul rând, calmarea traficului este interconectată cu planificarea urbană durabilă. Prin redefinirea raportului dintre spațiul public și funcțiunile mobilității, aceste măsuri sprijină tranziția orașelor spre modele *people-centered*, în care nevoile pietonilor, copiilor, persoanelor vârstnice sau cu dizabilități sunt prioritare față de fluidizarea excesivă a traficului motorizat.

5.1. Clasificarea tipurilor de măsuri de calmare a traficului rutier

Măsurile de calmare a traficului se împart în mai multe categorii, în funcție de natura intervenției asupra infrastructurii rutiere, percepția participanților la trafic și efectele urmărite. Clasificarea standard include: măsuri verticale, măsuri orizontale, măsuri vizuale și simbolice, măsuri combinatorii, precum și măsuri de control tehnologic.

Măsuri verticale de calmare a traficului

Acestea implică modificări de nivel ale platformei carosabile și sunt concepute pentru a genera disconfort fizic moderat conducătorilor auto care depășesc viteza recomandată.

Scopul este reducerea vitezei prin inducerea unei reacții reflexe de frânare.

Exemple:

- Limitatoare de viteză (*speed humps*) – ridicări transversale cu înălțime între 7–10 cm și lungime de cca 3,5 m. Reduc viteza la 20–30 km/h.

³¹ European Commission, „Urban Mobility Package.” Disponibil la <https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport>. Accesat la data de 15.12.2025.

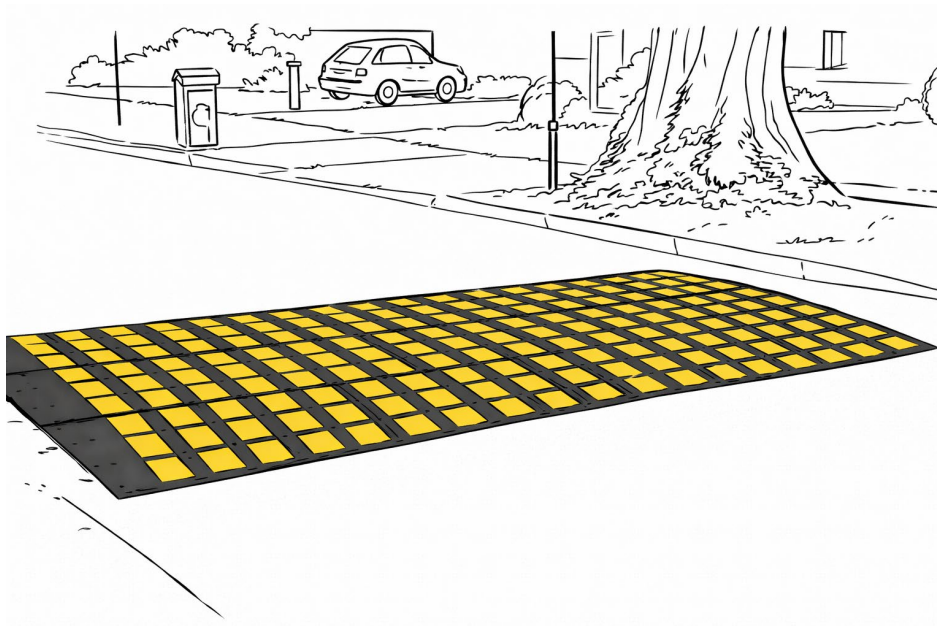


Figura 5.1. Limitatoare de viteză

- Bumpere (*speed bumps*) – mai abrupte și scurte decât humps, utilizate în parcuri sau zone private. Nu sunt recomandate în trafic public intens.

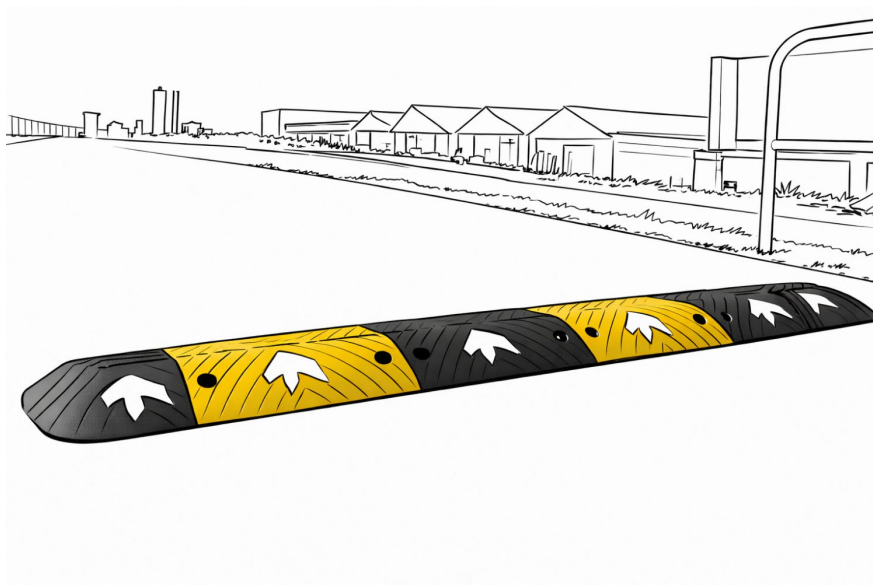


Figura 5.2. Bumper de plastic

- Platformă ridicată la intersecție / trecere pietonală – întreaga zonă este înălțată la nivelul trotuarului, forțând reducerea vitezei.

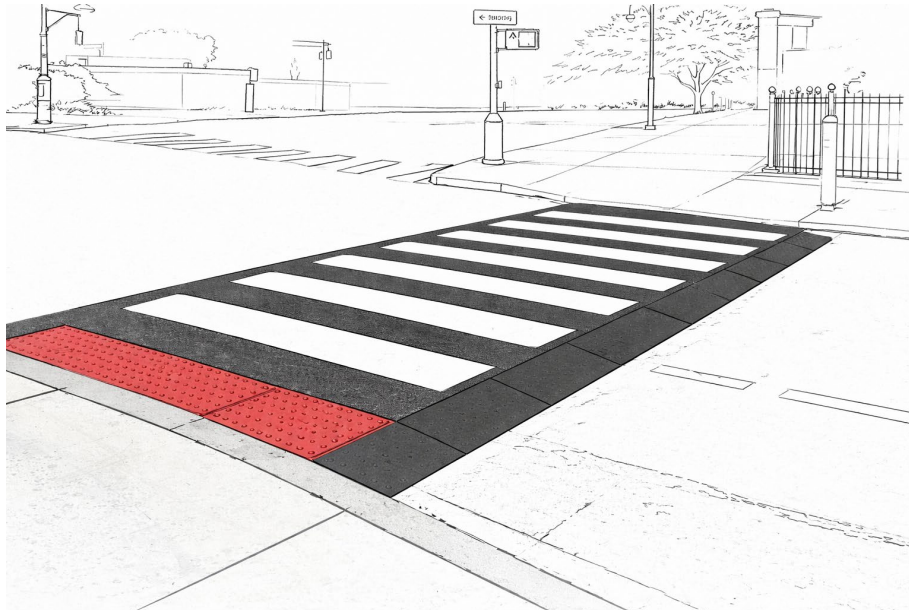


Figura 5.3. Platformă ridicată pentru trecerea de pietoni

- Valuri succesive (*speed tables*, sinusoidale) – adaptate traficului de tranzit cu autobuze. Oferă o tranziție mai lină, dar eficientă pentru reducerea vitezei.

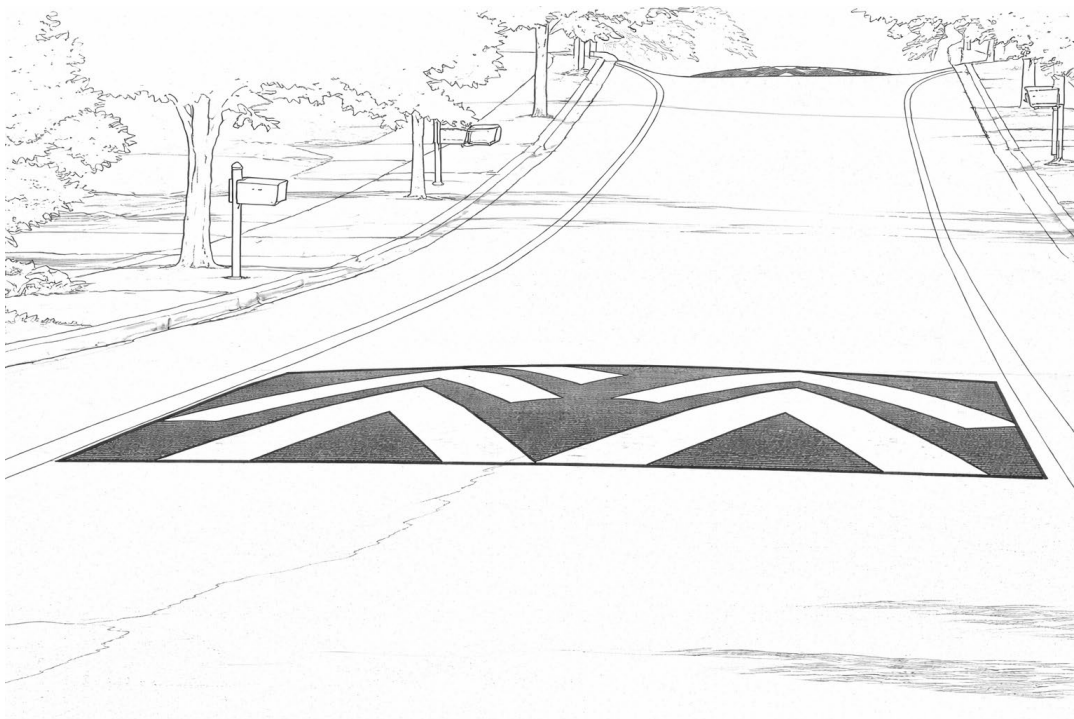


Figura 5.4. Val succesiv de limitatoare

Efecte:

- Reduceri medii de 15–20 km/h ale vitezei de circulație.
- Reducere cu până la 60% a accidentelor cu pietoni (NACTO, 2020).

Măsuri horizontale (geometrice) de calmare a traficului

Acestea modifică traseul și geometria drumului, obligând conducătorii auto să încetinească pentru a menține traiectoria sau pentru a evita obstacole construite.

Exemple:

- Gâturi de îngustare (*chokers*) – reducerea lățimii benzii de circulație, uneori alternată cu borduri extinse sau jardiniere.

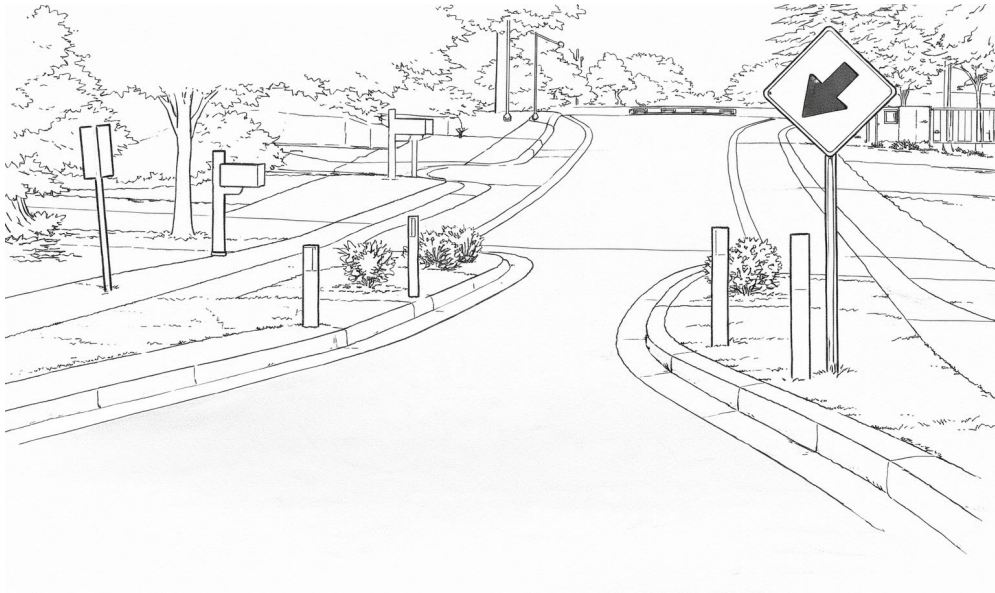


Figura 5.5. Gât de îngustare

- Refugii mediane / insule de calmare – separă fluxurile de sens opus și permit traversarea pietonilor în două timpi.

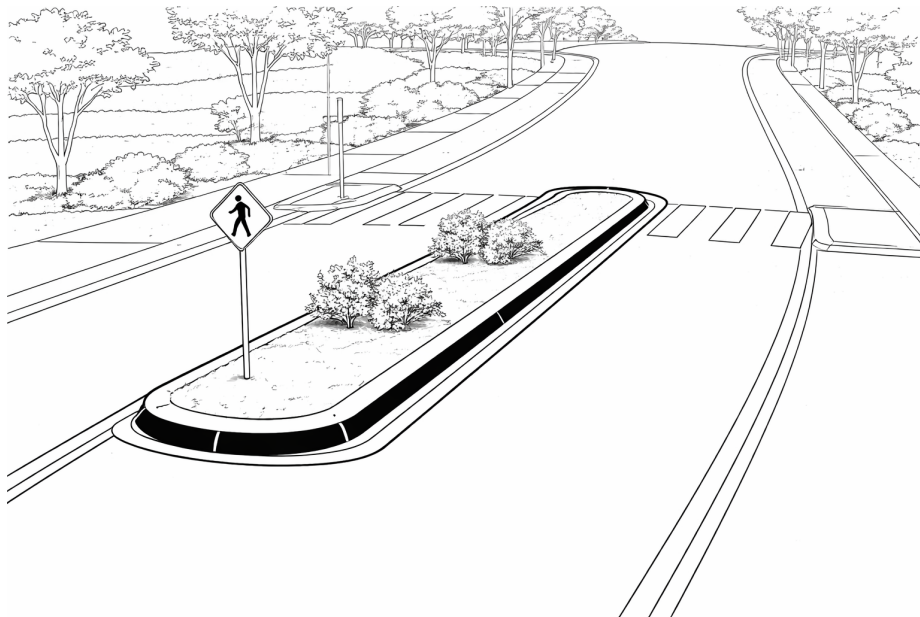


Figura 5.6. Refugiu median

- Slalomuri / șicane / *chicane* – amplasamente care obligă conducătorul auto să schimbe direcția de mers de mai multe ori.

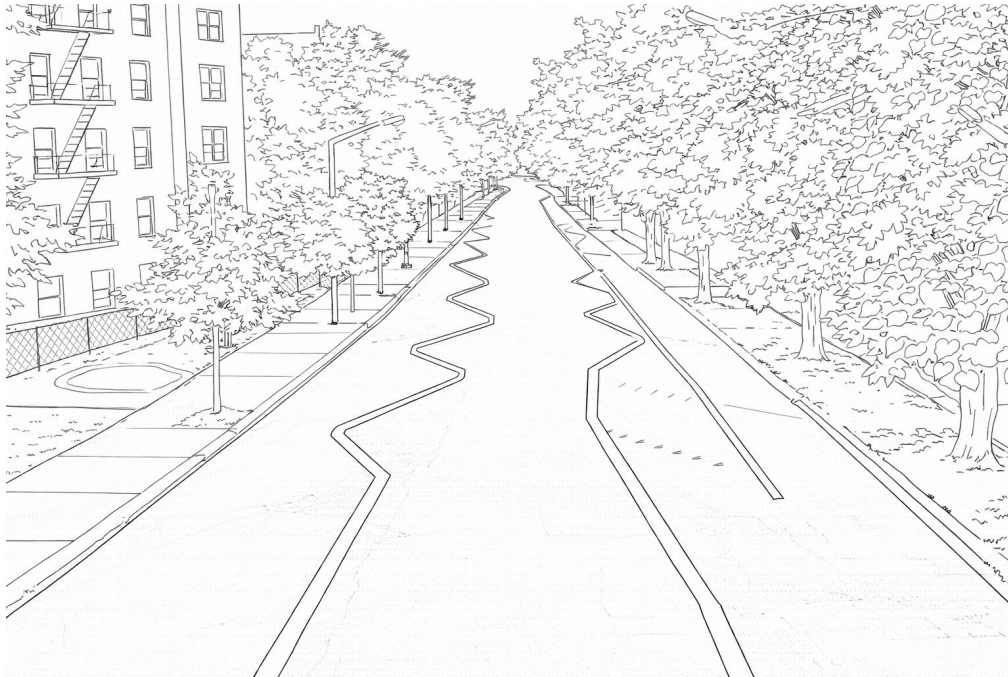


Figura 5.7. Slalomuri

- Îngustarea benzii (*road narrowing*) – o singură bandă utilizabilă alternativ în ambele sensuri, forțând colaborarea conducătorilor auto.



Figura 5.8. Îngustarea benzii

Efecte:

- Modificarea traiectoriei implică o atenție crescută.
- Vitezele scad cu 10–25% în zonele de aplicare.

Măsuri vizuale și simbolice

Sunt elemente percepute vizual și senzorial, care creează iluzia unei străzi mai înguste, mai lente, mai urbane. Acestea acționează mai ales la nivel psihologic și de percepție vizuală a riscului.

Exemple:

- Marcaje transversale progresive – benzi albe succesive care par să se apropie odată cu deplasarea, sugerând creșterea vitezei și impunând frânarea.
- Texturi și materiale contrastante – pavaj diferit (piatră cubică, asfalt colorat), denotă schimbarea regimului rutier.
- Mobilier urban și arbori – prezența copacilor pe aliniament reduce percepția de lățime a carosabilului.
- Iluminat pietonal dedicat și semnalizare verticală de impact – amplifică percepția de „zonă sensibilă”.

Efecte:

- Reducerea vitezei cu 5–10 km/h chiar și fără obstacole fizice.
- Creșterea gradului de atenție și percepție a pietonilor.

Măsuri combinate (integrate)

În practică, cele mai eficiente soluții de calmare combină două sau mai multe tipuri de măsuri (ex: platformă ridicată + vegetație + semnalizare reflectorizantă).

Exemple:

- Zone 30 – delimitări urbane unde toate arterele sunt reconfigurate pentru viteză maximă de 30 km/h, cu elemente combinate de calmare.
- *Superblocks* (ex: Barcelona) – zone în care prioritățile de mobilitate sunt inversate complet, folosind calmarea ca instrument de regenerare urbană.

Măsuri de calmare prin control tehnologic

Intervențiile digitale și ITS pot susține măsurile fizice sau le pot înlocui în zone sensibile.

Exemple:

- Radare fixe cu afisaj de viteză instantanee („*Speed Feedback Signs*”)



Figura 5.9. Radar cu afișaj

- Semaforizare adaptivă la viteza vehiculului
- Camere automate de monitorizare și penalizare a vitezei
- Monitorizare prin senzori IoT pentru trafic lent / biciclete / pietoni

Efecte:

- Conștientizarea imediată a comportamentului rutier.
- Posibilitate de integrare în sistemele de *smart city*

Această clasificare oferă autorităților locale și proiectanților de drumuri o paletă variată de opțiuni, adaptabile în funcție de:

- tipul străzii,
- intensitatea traficului,
- profilul utilizatorilor,
- obiectivele de mobilitate și siguranță.

5.2.Efectele psihologice ale măsurilor de calmare a traficului asupra conducătorilor auto

Măsurile de calmare a traficului nu operează doar la nivel fizic, prin modificarea geometriei drumului sau introducerea unor obstacole vizuale și structurale, ci și la un nivel profund psihologic, influențând percepția, cogniția și decizia conducătorului auto. Această abordare vizează schimbarea comportamentului rutier prin stimuli subtili și controlabili din mediul construit, ceea ce face ca măsurile să fie eficiente chiar și în lipsa unei prezențe active a autorităților de control.

Percepția subconștientă a riscului

Măsurile precum îngustările optice, pavajele diferite, vegetația apropiată sau lipsa liniei centrale determină o percepție subconștientă a pericolului. Studiile arată că atunci când conducătorul auto simte că spațiul disponibil este redus sau instabil, acesta reacționează automat prin scăderea vitezei. Acest efect este mult mai eficient decât semnalizarea standard, întrucât implică mecanisme de auto-reglare cognitivă, nu doar conformare la reguli.

Reducerea agresivității și comportamentului competitiv

Un drum larg, fără delimitări sau fără obstacole psihologice, favorizează comportamente de dominare rutieră: depășiri riscante, accelerare nejustificată, neacordarea priorității. În schimb, zonele calmate, cu prezență vizuală crescută a pietonilor, vegetație joasă și mobilier urban, induc o stare de cooperare socială în trafic. Conducătorul auto nu mai percepe drumul ca pe un „coridor de tranzit” ci ca pe un spațiu partajat cu alți utilizatori, ceea ce reduce comportamentele ostile.

Creșterea atenției selective și a stării de alertă

Spre deosebire de segmentele monotone, măsurile de calmare mențin conducătorul auto într-o stare activă de vigilență. De exemplu, șicanele (*chicanele*), platformele ridicate sau lipsa liniei centrale solicită atenție constantă pentru evaluarea poziției și distanțelor. Acest efect este pozitiv în special în zonele urbane dense, unde apariția bruscă a pietonilor sau a bicicliștilor trebuie detectată rapid. Astfel, calmarea traficului acționează ca un activator cognitiv compensatoriu.

Modificarea planificării decizionale

Un drum convențional permite conducătorului auto să opereze „pe pilot automat”, cu planificare anticipată pe zeci de secunde. În schimb, într-o zonă calmă, planificarea decizională devine pe scurt timp, adaptivă și reactivă, ceea ce obligă la o implicare mai mare a cortexului prefrontal (centru al deciziilor). De aceea, în zonele *shared space* sau cu intersecții fără semne de prioritate, comportamentul este bazat pe negociere vizuală și empatie, mai degrabă decât pe rutină.

Timpul de reacție și spațiul de frânare

În zone calmate, viteza redusă crește timpul disponibil pentru reacție și scade lungimea necesară de oprire. Spre exemplu, reducerea vitezei de la 50 km/h la 30 km/h scade distanța de frânare cu 13–15 metri în condiții urbane tipice. Din punct de vedere psihologic, viteza redusă implică procesare cognitivă mai bună și decizii mai sigure în fața situațiilor neprevăzute.

Creșterea conformității comportamentale

Atunci când infrastructura ghidează comportamentul fără a impune reguli agresive (precum semnele de avertizare în exces), conducătorul auto este mai predispus la conformare voluntară. Este mai eficientă o stradă estetică, îngustă și pavată decât una cu 5 semne de limitare a vitezei. Acest fenomen este cunoscut ca *compliance behavior through design*, conformare prin design.

Reducerea stresului și a agresivității

Încetinirea fluxului și apropierea de spațiile verzi sau urbane oferă o experiență de condus mai relaxată, în special în drumurile de tranzit din orașe. Vegetația perimetrală, arhitectura coerentă sau spațiile pietonale extinse pot induce o stare psihologică de *slow mobility*, diferită de tensiunea obișnuită din traficul convențional.

Evitarea dezorientării sau confuziei

Dacă sunt aplicate incorect sau inconsistent, măsurile de calmare pot genera confuzie sau comportamente contradictorii. Spre exemplu, platforme ridicate în zone nejustificate sau marcaje neclare pot duce la decizii eronate, în special la conducători neexperimentați sau străini de zonă. De aceea, consistența semnalizării și coerența spațială sunt de bază pentru ca măsurile să inducă reacțiile dorite.

Rolul culturii locale și al expectanței

Efectele psihologice variază în funcție de cultura rutieră locală. În unele țări nordice, calmarea este asociată cu norme sociale puternice (ex: Norvegia), în timp ce în altele, precum România, încă există percepții de trasee privilegiate pentru autovehicule. Astfel, eficiența psihologică depinde de așteptările conducătorilor, de gradul de acceptare socială și de obișnuința cu aceste măsuri.

Sinergie cu sistemele ITS și semnalizarea inteligentă

Noile tehnologii ITS pot amplifica efectele psihologice ale măsurilor de calmare. De exemplu, radare cu afișaj al vitezei (ex: „Conduci cu 43 km/h”) generează feedback vizual imediat, ceea ce activează autoreglarea cognitivă. Combinarea ITS cu infrastructura calmantă (platforme, marcaje optice) oferă cele mai bune rezultate în modificarea comportamentului.

6. Analiza caracteristicilor factorului uman participant la traficul rutier

Participarea factorului uman în trafic reprezintă rolul central în funcționarea oricărei rețele rutiere și condiționează siguranța, fluenta și eficiența circulației autovehiculelor, bicicletelor, trotinetelor și pietonilor. În analiza traficului rutier, comportamentul conducătorilor auto, pasagerilor și utilizatorilor devine parte integrantă a modelelor macroscopice și microscopice. Factorii psiho-fizici, inclusiv capacitățile senzoriale, atenția, timpul de reacție și percepția situațională, influențează deciziile luate în secțiuni critice: intersecții, schimbări de benzi, evitări de obstacole, frânări și accelerații.

Din perspectiva mobilității urbane, un conducător auto trebuie să facă față simultan la stimuli vizuali (semnalizare, vehicule în jur, marcaje rutiere), auditivi (sunete ale traficului, avertizări sonore), olfactivi (poluare), kinestezici (sensibilitate la vibrații, postura corpului) și psihici (stres, decizie). Viteza de reacție a conducătorului, capacitatea de a procesa rapid informații și de a anticipa evoluțiile conferă un impact direct asupra frecvenței de incidentă și a capacității de trafic. Pasagerii din autovehicul, fie pe locul din dreapta, fie pe cele din spate, contribuie la amenajarea spațiului interior și pot afecta confortul și atenția conducătorului, prin comportament, solicitări conversaționale sau manipulări ale sistemelor auto.

Bicicliștii și utilizatorii de trotinete electrice reprezintă participanți vulnerabili ai traficului, cu percepție diferită, echipament limitat de protecție și reacție kinetică diferită față de autovehicule. Ei pot fi nesiguri la vizibilitate redusă și pot interacționa mai imprudent cu conducătorii auto. Pietonii, la rândul lor, folosesc simțuri senzoriale reduse: vederea, auzul și chiar tactil (asfalt umed, obstacole) pentru a decide traversarea sau deplasarea pe trotuar. Comportamentul lor este modelat de factori psihologici (grabă, eroare de percepție), infrastructura urbană și regimul de semaforizare.

Analiza caracteristicilor factorului uman atrage atenția și asupra limitei fizice a simțurilor. De pildă, timpul de reacție mediu unui conducător auto variază între 1,0 și 1,5 secunde în condiții normale, dar se poate extinde în situații de oboseală, vizibilitate redusă sau stare emoțională perturbată. Această variabilitate introduce incertitudine în modelele de siguranță (calculul distanței de frânare, decizii de schimbare bandă). Atenția divizată, când conducătorul efectuează conversații, folosește telefonul mobil sau este distras, duce la creșterea perioadei decizionale și, implicit, la creșterea riscului de incidente.

Factorii olfactivi (mirosul fumului, poluarea intensă) pot afecta starea psihică a participantului, mai ales în transportul public sau în zone intens circulate. Kinestezia, simțul

poziției și mișcării, este utilizată pentru menținerea controlului asupra direcției, mai ales în viraje sau la viteze mari. În general, studiile psihologice arată că percepția umană se degradează sub stres; astfel, complexitatea mediului de trafic (numeroase stimuli simultani) poate suprasolicita sistemele senzoriale, reducând capacitatea de reacție corectă.

Factorii psihici ai participanților sunt influențați de motivație (depășirea vehiculelor în trafic, graba) și de senzația de siguranță sau risc. Motivația de a urma trasee necunoscute, de a evita plata parcării sau de a merge pe trasee ocolitoare poate modifica radical diagramele de origine – destinație. Aceasta interacționează cu percepția asupra infrastructurii (calitatea drumului, iluminatul, marcajele) și deciziile în trafic (depășiri, frânări, utilizare benzi reversibile).

Pentru o analiză completă a traficului urban și interurban, factorul uman trebuie integrat în mod explicit în modelele moderne, atât prin parametrii microscopici (spațiul și timpul intervehicular), cât și macroscopici (viteza medie are limită fizică impusă de aptitudinile conducătorului).

6.1. Analiza caracteristicilor conducătorului auto

Conducătorul auto reprezintă principala verigă activă în lanțul de siguranță rutieră și eficiență a traficului. Spre deosebire de pasageri sau participanți pasivi, conducătorul auto are responsabilitatea directă asupra manevrării autovehiculului și asupra reacției la stimuli dinamici ai mediului rutier. El integrează în timp real informații senzoriale, le procesează cognitiv și ia decizii care influențează nu doar propria deplasare, ci și securitatea altor participanți la trafic. Acest cumul de responsabilități face ca analiza sa, ca factor uman, să fie centrală în ingineria traficului.

Sistemul senzorial al conducătorului auto funcționează ca un ansamblu integrat de receptori care preiau date din mediu: ochii percep marcaje, semne de circulație și alte vehicule; urechile captează semnalele sonore; iar sistemele kinestezic și vestibular ajută la menținerea echilibrului și a poziției autovehiculului pe traiectorie. Simțul olfactiv poate semnala prezența fumului sau a scurgerilor din autovehicul, în timp ce sensibilitatea tactilă contribuie la evaluarea controlului asupra comenzilor (volan, pedale, schimbător).

Atenția este una dintre resursele cognitive cele mai importante pentru conducător. Ea poate fi focalizată (pe un stimul precis), divizată (între mai multe sarcini) sau distrasă. În mediul urban, unde fluxurile sunt complexe și imprevizibile, menținerea atenției pe parcursul unui interval lung de timp este esențială pentru prevenirea accidentelor. În același timp, atenția poate fi perturbată de factori interni (stres, oboseală) sau externi (publicitate rutieră, conversații cu pasagerii).

Proiectarea decizională a conducătorului auto implică trei pași succesivi: perceperea unui stimul, analiza contextului și alegerea acțiunii potrivite. Acest proces decizional este supus atât influențelor cognitive (experiența, rutina), cât și afective (frică, iritare). O decizie greșită, fie de frânare întârziată, fie de virare necorespunzătoare, poate duce la coliziuni sau blocaje.

Viteza de reacție a conducătorului auto este un parametru de bază în calculul siguranței rutiere. Ea este definită ca intervalul de timp dintre perceperea unui pericol și inițierea unei acțiuni corective. În condiții normale, această durată variază între 1,0 și 1,5 secunde. Factori precum vârsta, starea de sănătate, utilizarea alcoolului sau substanțelor psihoactive pot modifica semnificativ acest interval, crescând riscul de incident.

Oboseala influențează capacitatea de reacție și de concentrare a conducătorului auto. Conducătorii oboșiți pot experimenta „microsomnuri”, adică perioade de câteva secunde de pierdere a conștiinței, extrem de periculoase la volan, în special pe drumuri monotone (în aliniament) sau pe timp de noapte.

Motivația are un rol determinant în stilul de condus. Un conducător auto care se grăbește sau se simte presat să ajungă la destinație va manifesta o tendință crescută de asumare a riscurilor: depășiri periculoase, viteze peste limita legală, ignorarea semnalizării. În schimb, o motivație axată pe siguranță și conformitate determină un comportament preventiv și predictibil.

Conformitatea cu legislația rutieră reflectă nivelul de educație rutieră și de internalizare a normelor sociale. Conducătorii auto care au participat la cursuri de conducere defensivă sau care au experiență extinsă demonstrează un grad mai mare de respectare a regulilor. În schimb, lipsa instruirii adecvate sau influențele negative din grupul social pot determina abateri frecvente de la comportamentul corect în trafic.

Interacțiunea cu forțele de ordine și cu infrastructura inteligentă de transport este o componentă tot mai relevantă. Prezența poliției sau a camerelor radar determină conducătorii să ajusteze comportamentul, reducând viteza sau sporind atenția. Sistemele ITS (semnalizare variabilă, alerte automate) oferă informații utile în timp real, dar pot și suprasolicita capacitatea de procesare a conducătorului.

Diferențele individuale între conducători (vârstă, gen, experiență) generează variații semnificative ale performanței în trafic. Conducătorii tineri, de exemplu, tind să subestimeze riscurile și să adopte stiluri agresive, în timp ce conducătorii auto vârstnici pot avea dificultăți la procesarea rapidă a informațiilor sau la coordonarea motrică.

Condițiile meteo și de drum influențează acuitatea simțurilor conducătorului. Ceața, ploaia, ninsoarea sau drumurile alunecoase reduc câmpul vizual, modifică timpii de frânare și cresc solicitarea cognitivă. În aceste condiții, capacitatea conducătorului auto de a estima corect distanțele și vitezele celorlalte vehicule este diminuată.

Tehnologiile moderne din autovehicule, sisteme de asistență la frânare, corectare de bandă, navigație asistată, pot susține, dar și înlocui parțial simțurile umane. Cu toate acestea, acestea nu pot compensa complet deciziile proaste, neatenția sau lipsa de reacție, motiv pentru care responsabilitatea conducătorului rămâne primordială.

Emoțiile joacă un rol subtil dar important. Furie, frică, euforie sau anxietate pot altera drastic capacitatea de reacție și luarea deciziilor. De exemplu, un conducător auto supărat poate manifesta comportamente de șicanare, frânări bruște sau urmăriri periculoase, cu efecte directe asupra siguranței rutiere.

Un alt factor important este utilizarea tehnologiei mobile. Interacțiunea cu telefoanele inteligente, chiar și prin sisteme mâini-libere (*hands-free*), determină o scădere a atenției vizuale și cognitive. Astfel de comportamente sunt cauza frecventă a accidentelor cu coliziune din spate sau a celor în intersecții.

Așadar, conducătorul auto este un participant activ și complex, al cărui comportament influențează în mod direct performanțele rețelei rutiere. Analiza sa trebuie să țină cont de un spectru larg de factori: fiziologici, psihologici, sociali și tehnologici, integrați în modelele de trafic și strategiile de siguranță rutieră.

Vederea – simțul dominant în conducerea autovehiculului

Vederea este responsabilă pentru aproximativ 90% din informațiile percepute în timpul conducerii unui autovehicul. Prin vedere, conducătorul auto detectează obstacole, citește semnele de circulație, observă mișcările celorlalți participanți și poziția propriului vehicul pe carosabil.

Deficiențele de vedere, cum ar fi miopia, hipermetropia, daltonismul sau scăderea vederii nocturne, pot afecta semnificativ capacitatea de reacție. De exemplu, vederea slabă pe timp de noapte reduce distanța de detecție a obstacolelor și crește riscul coliziunii frontale. Vederea periferică reprezintă baza pentru anticiparea vehiculelor din unghiul mort sau a pietonilor care pășesc pe carosabil.

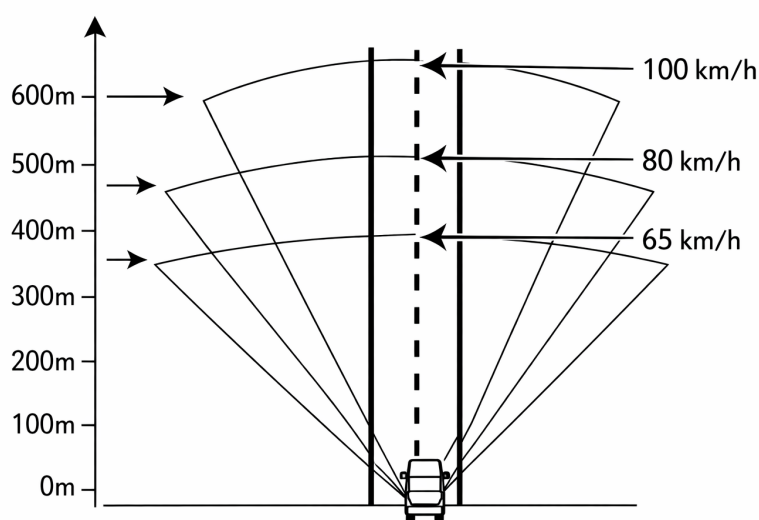


Figura 6.1. Câmpul vizual al conducătorului auto în funcție de viteza de rulare

Pe măsură ce viteza de deplasare a unui autovehicul crește, sistemul vizual uman suferă o transformare perceptivă semnificativă, manifestată prin fenomenul cunoscut sub denumirea de viziune în tunel (*tunnel vision*). Acest fenomen descrie îngustarea progresivă a câmpului vizual funcțional, adică porțiunea din spațiul vizual pe care conducătorul auto o poate procesa eficient pentru luarea deciziilor în trafic. Fenomenul are la bază limitările fiziologice ale sistemului senzorial uman, în special ale retinei și ale procesării neuronale centrale, dar și suprasolicitarea cognitivă ce însoțește viteza ridicată de deplasare.

La viteze mici, de până la 40 km/h, câmpul vizual perceput și analizat de către conducătorul auto este relativ complet, extinzându-se până la aproximativ 180°. În aceste condiții, conducătorul auto poate percepe cu claritate și precizie informații atât din zona centrală a privirii, cât și din câmpul vizual periferic, esențial pentru anticiparea pericolelor din laterale, observarea pietonilor sau a bicicliștilor, precum și pentru urmărirea semnalizării laterale. Pe măsură ce viteza crește, acest câmp vizual începe să se restrângă.

La viteze medii, cuprinse între 50 și 80 km/h, câmpul vizual eficient se reduce treptat la circa 100–120°. În această fază, conducătorul auto începe să acorde o atenție tot mai mare zonei centrale din față, în detrimentul detaliilor laterale, care sunt percepute mai vag sau complet ignorate. Această redistribuire a atenției vizuale este un mecanism adaptativ menit să favorizeze reacții rapide la obstacolele sau schimbările de pe axul principal al drumului, însă se face în detrimentul vigilenței laterale.

La viteze mari, peste 100 km/h, câmpul vizual funcțional poate scădea dramatic, atingând valori de 40–60°, ceea ce înseamnă o concentrare vizuală aproape exclusivă în față. Această restrângere are implicații majore asupra siguranței rutiere, deoarece obiectele sau pericolele care apar din lateral, cum ar fi pietoni care intenționează să traverseze, vehicule care ies dintr-o parcare laterală sau indicatoare amplasate pe marginea carosabilului, sunt percepute târziu sau chiar complet ignorate.

Impactul direct al îngustării câmpului vizual este reflectat în scăderea capacității de anticipare, creșterea timpului de reacție și apariția unei stări de stres vizual. Acest lucru este deosebit de periculos în zonele urbane sau în intersecții nesemaforizate, unde sursele de pericol pot apărea simultan din mai multe direcții. De asemenea, suprasolicitarea atenției vizuale frontale duce la oboseală mai rapidă și la o scădere a performanțelor decizionale ale conducătorului auto.

Efecte asupra comportamentului în trafic:

- Timpul de reacție este afectat: obiectele apărute din lateral sunt detectate mai târziu.
- Capacitatea de anticipare scade, în special în intersecții, curbe sau zone pietonale.

- Rata de implicare în accidente laterale și coliziuni cu obstacole nemarcate crește.
- Crește nevoia de concentrare și oboseala vizuală, în special pe autostrăzi sau drumuri expres.

Consecințe practice:

- Drumurile de mare viteză au margini bine delimitate, benzi late și semnalizare centrală pentru a compensa această îngustare.
- În zonele urbane, limitările de viteză (30–50 km/h) sunt stabilite și pentru a permite menținerea câmpului vizual periferic și deciziile rapide.
- Unele sisteme avansate de asistență (ADAS) monitorizează direcția privirii și avertizează conducătorul auto dacă nu analizează zona periferică.

Auzul – simțul complementar pentru avertizare

Auzul ajută conducătorul auto să perceapă semnale sonore din mediu: sirene de ambulanță, claxoane, zgomote de frânare, vibrații anormale ale motorului. Auzul funcționează adesea ca un „sistem de alertă anticipată” în cazuri în care vederea nu este suficient de rapidă sau clară.

Persoanele cu hipoacuzie pot avea dificultăți în a detecta pericolele care nu sunt vizibile imediat. De asemenea, muzica dată la volum mare sau purtarea căștilor în timpul condusului pot reduce capacitatea auditivă și afectează timpul de reacție.

Simțul olfactiv – indicator de urgențe tehnice

Deși mai puțin implicat în mod constant, simțul olfactiv are un rol important în detectarea defecțiunilor tehnice sau pericolelor chimice. Mirosul de benzină, de plastic încins sau de fum poate semnala o problemă gravă la motor, la instalația electrică sau la sistemul de frânare.

Simțul olfactiv este de asemenea important pentru detecția scurgerilor de gaze sau pentru identificarea unor stări modificate de sănătate (ex: mirosuri neplăcute cauzate de greață, care pot afecta concentrarea). Deși nu este folosit în procesul de conducere în mod deliberat, el are o funcție protectivă și reactivă.

Simțul tactil – feedback pentru control

Simțul tactil este esențial în perceperea feedbackului mecanic al vehiculului: vibrațiile din volan, rezistența la pedale, senzația de derapaj sau de pierdere a aderenței. Tactilitatea ajută conducătorul să ajusteze fin forța aplicată asupra comenzilor și să identifice nereguli (ex: pedala de frână moale, volanul care trage într-o parte).

Vehiculele moderne echipate cu asistenți activi (de exemplu, avertizare la părăsirea benzii cu vibrații în volan) se bazează tocmai pe acest simț pentru a comunica cu conducătorul

auto. Lipsa simțului tactil (de exemplu în cazul purtării de mănuși groase iarna) poate duce la pierderea fineței controlului.

Simțul kinestezic și proprioceptiv – echilibru și percepția mișcării

Aceste simțuri interne ajută la perceperea accelerației, frânării, virajelor și înclinării autovehiculului. Ele sunt activate prin receptori localizați în mușchi și articulații, care informează conducătorul despre poziția corpului în raport cu vehiculul și drumul.

În curbe sau la manevre bruște, simțul kinestezic contribuie la menținerea echilibrului postural și la anticiparea unor reacții de compensare, cum ar fi corectarea direcției. În condiții de oboseală sau boli vestibulare, această percepție poate fi alterată, afectând coordonarea și echilibrul.

Simțurile combinate – integrarea multisenzorială

În timpul conducerii, creierul trebuie să integreze simultan informații din toate simțurile, proces numit integrare multisenzorială. Dacă una dintre surse oferă semnale contradictorii (de exemplu, vezi că semaforul e roșu, dar nu auzi nicio reacție de frânare din trafic), deciziile pot fi întârziate sau incorecte.

În situații complexe precum ceață densă, trafic aglomerat, semnale contradictorii – capacitatea de a combina corect informațiile senzoriale devine critică. Sistemele automate de avertizare și realitatea augmentată în vehicule tind să completeze aceste simțuri, dar ele nu le pot înlocui complet.

Atenția – filtrul cognitiv al informației rutiere

Atenția este procesul psihic care permite selectarea, menținerea și redirecționarea concentrării asupra informațiilor relevante din trafic. Există mai multe tipuri de atenție implicate în conducere:

- Atenția selectivă: ex. identificarea unui semn de circulație printre alte panouri publicitare;
- Atenția distributivă: ex. urmărirea oglinzilor, a vitezometrului și a drumului în același timp;
- Atenția susținută: esențială pentru condusul pe distanțe lungi, fără erori.

Scăderea nivelului atenției (ex. oboseală, stres, folosirea telefonului mobil) este asociată cu un risc crescut de accidente.

Viteza de reacție – timpul între percepție și acțiune

Viteza de reacție reprezintă intervalul de timp dintre apariția unui stimul rutier (vizual, auditiv etc.) și inițierea unei acțiuni motorii (ex. apăsarea frânei).

Valori medii:

- Conducători auto tineri odihniți: 0,7 – 0,9 s
- Sub influența alcoolului: >1,2 s
- În caz de oboseală sau somnolență: chiar >2,0 s

Viteza de reacție este influențată de vârstă, stare de sănătate, experiență, consum de substanțe, dar și de starea emoțională (ex. stresul o poate reduce). Timpul de reacție este esențial pentru determinarea distanței de oprire și pentru proiectarea semnalizării rutiere.

Oboseala – diminuarea treptată a capacității psihice și fizice

Oboseala afectează vigilența, coordonarea motrică, atenția și viteza de reacție. La conducătorii auto profesioniști, oboseala este una dintre principalele cauze de accidente pe autostrăzi.

Simptomele includ:

- Clipit frecvent, ochi uscați;
- Devieri laterale ale traiectoriei;
- Încetinirea reacțiilor;
- Microsomnolențe involuntare (1–3 secunde).

Organizația Mondială a Sănătății recomandă pauze de minimum 15 minute la fiecare 2 ore de condus continuu. Sistemele moderne ITS (ex: avertizare la părăsirea benzii) includ senzori de monitorizare a oboselii.

Proiectarea decizională – luarea de decizii rapide în trafic

Conducerea implică luarea rapidă a deciziilor în medii dinamice și adesea ambigue. Deciziile pot fi simple (ex: frânare la semafor roșu) sau complexe (ex: depășirea unui autovehicul lent cu trafic din sens opus).

Procesul decizional este influențat de:

- Experiență și cunoștințe;
- Nivelul de stres sau presiunea timpului;
- Caracteristici cognitive: capacitatea de anticipare și evaluarea riscurilor.

Modelele cognitive de luare a deciziilor clasifică răspunsurile în: bazate pe reguli, bazate pe cunoștințe și automate. În trafic, majoritatea acțiunilor devin automatizate odată cu experiența, dar deciziile rare (ex: evitarea unui obstacol apărut brusc) rămân critice.

Motivația – impulsul de a conduce prudent sau riscant

Motivația determină gradul de implicare activă și calitatea deciziilor în trafic. Un conducător auto cu motivație orientată spre siguranță va evita depășirile riscante și va respecta limitele de viteză. În schimb, motivația de tip competitiv sau agresiv crește probabilitatea de comportamente periculoase.

Motivația este influențată de:

- Obiective personale (ex: a ajunge repede vs. a ajunge în siguranță);
- Norme sociale;
- Recompense și sancțiuni (ex: amenzi, puncte de penalizare, reputație).

Conformitatea cu legislația – internalizarea regulilor de trafic

Gradul în care un conducător auto respectă regulile de circulație reflectă nivelul său de conformitate cu normele legale. Conformitatea este influențată de:

- Nivelul de educație rutieră;
- Experiența anterioară cu sancțiuni;
- Prezența controlului poliției rutiere;
- Modelele sociale (ex: stilul de condus observat în familie sau cercul de prieteni).

Campaniile de educație rutieră și sistemele automate de monitorizare (radare, camere video) urmăresc creșterea acestui nivel de conformitate.

Interacțiunea cu poliția și ITS – influențe externe asupra comportamentului

Conducătorii auto reacționează diferit la prezența vizibilă a autorităților rutiere sau a sistemelor inteligente de transport:

- Prezența poliției pe drum determină o scădere bruscă a vitezei medii;
- Detectoarele de radar sau sistemele de navigație tip *Waze* creează un comportament oscilant (accelerări/bruscări);
- ITS-urile cu feedback vizual (ex: panouri VMS, semafoare inteligente) influențează luarea deciziilor în timp real.

6.2. Analiza caracteristicilor și influenței pasagerului din dreapta

În ansamblul participării umane la trafic, pasagerul aflat pe locul din dreapta față a autovehiculului, adesea denumit „copilotul civil”, ocupă o poziție unică. Deși nu deține un rol activ în manevrarea autovehiculului, prezența sa are implicații semnificative în ceea ce privește dinamica decizională a conducătorului auto, percepția spațială, nivelul de stres și eficiența comunicării din habitacul.

Pasagerul frontal dispune de un câmp vizual apropiat de cel al conducătorului, ceea ce îl poziționează în postura de observator secundar al mediului rutier. Această proximitate vizuală îl poate transforma într-un factor de sprijin sau, din contră, într-un distractor cognitiv, în funcție de comportamentul verbal, nonverbal și de atitudine.

Din perspectiva comunicării intra-vehicul, pasagerul din dreapta este interlocutorul principal al conducătorului auto. Această interacțiune poate contribui la reducerea monotoniei în trafic și menținerea vigilenței, dar poate, totodată, conduce la pierderi de atenție critice, mai ales în condiții de trafic dens sau în situații de urgență rutieră. Tonul, volumul și conținutul comunicării sunt esențiale pentru păstrarea unui climat psihologic optim în habitacul.

O contribuție funcțională a pasagerului din dreapta este gestionarea unor sarcini secundare, precum ajustarea sistemului de climatizare, reglarea GPS-ului, selectarea sursei audio sau consultarea hărților. Prin preluarea acestor sarcini, pasagerul eliberează conducătorul auto de interacțiuni periculoase cu ecrane sau butoane, contribuind astfel indirect la siguranța rutieră.

Viziunea laterală a pasagerului completează uneori percepția spațială a conducătorului auto, mai ales în intersecții cu vizibilitate redusă sau la manevrele de depășire, când observarea punctului mort devine o sarcină partajată. Exprimări verbale precum „poți intra”, „vine cineva” sau „liber pe partea stângă” pot avea valoare decizională semnificativă în contextul în care oglinzile nu oferă acoperire completă.

Totuși, această influență vizuală poate deveni negativă dacă pasagerul emite judecăți hazardate, încurajează depășiri riscante sau induce neîncredere. Studiile în psihologia rutieră au evidențiat că pasagerii dominanți sau critici pot crește nivelul de stres al conducătorului auto, influențând negativ luarea deciziilor și timpul de reacție.

Din punct de vedere ergonomic, pasagerul din față contribuie și la reglarea microclimatului: poate deschide sau închide geamurile, modifica temperatura sau ventilația, influențând confortul termic al ocupanților, în special al conducătorului auto. O temperatură neadekvată (prea cald sau prea rece) este un factor perturbator cognitiv recunoscut în literatura de specialitate.

În ceea ce privește echilibrul psihologic, pasagerul poate reprezenta un factor de susținere afectivă sau de destabilizare, în funcție de relația personală cu conducătorul auto. În cazul deplasărilor lungi, compania unui pasager agreabil poate combate efectele monotonei drumului și reduce riscul de adormire la volan.

Pasagerul din dreapta are, de asemenea, capacitatea de a modifica comportamentul conducătorului auto, fie în sens pozitiv (prin feedback constructiv, calm și empatie), fie negativ (prin impulsivitate, grabă sau critică constantă). Există o corelație semnificativă între comportamentul agresiv al conducătorului auto și solicitările sau comentariile stresante primite de la pasageri.

Comunicarea verbală cu pasagerul este, în general, acceptată ca fiind mai puțin distructivă decât cea telefonică, întrucât interlocutorul din habitacul percepe contextul rutier și își poate ajusta discursul în funcție de intensitatea situației. Cu toate acestea, conversațiile intense sau în contradictoriu pot interfera sever cu atenția și viteza decizională.

Pasagerii din dreapta au și un rol simbolic în procesul decizional rutier, conducătorii auto sunt mai predispuși să conducă prudent în prezența persoanelor dragi (copii, parteneri) și mai agresiv atunci când sunt însoțiți de prieteni sau colegi. Acest aspect subliniază influența psihosocială indirectă a pasagerului asupra nivelului de asumare a riscurilor.

În mediile urbane, pasagerul poate fi responsabil cu navigarea sau interpretarea aplicațiilor GPS, dar acest rol necesită o sincronizare clară cu ritmul de conducere. O indicație întârziată sau ambiguu exprimată poate induce confuzii, viraje bruște sau blocări de bandă.

În caz de urgență (ex: accident, blocaj, rău subit), pasagerul devine agent de intervenție: poate apela serviciile de urgență, oferi informații relevante sau acorda prim ajutor. Astfel, antrenarea minimă a pasagerilor în conduite de siguranță este dezirabilă, mai ales în transportul familial sau profesional.

O altă latură importantă este respectarea propriei discipline de siguranță, centura de siguranță este obligatorie și pentru pasagerul din față, iar lipsa acesteia nu doar că este ilegală, dar îl transformă într-un „proiectil” în caz de coliziune frontală, cu potențial letal asupra sa și asupra conducătorului auto.

Contribuția la comunicare intra-habitacul

Pasagerul din dreapta este interlocutorul cel mai frecvent și influent în vehicul. Comunicarea verbală poate oferi sprijin cognitiv, reducând stresul și monotonia în trafic, în special pe trasee lungi sau în trafic aglomerat. Totuși, conversațiile nepotrivite temporal sau prea încărcate emoțional pot deveni distrugători cognitivi. Spre deosebire de convorbirile telefonice, comunicarea cu un pasager este adesea mai puțin perturbatoare, deoarece acesta percepe contextul rutier și poate opri discuția când detectează o situație de risc.

Manipularea sistemelor secundare (climatizare, multimedia, GPS)

Pasagerul frontal poate prelua controlul asupra unor elemente precum sistemul de climatizare, navigația sau sursa audio. Acest lucru eliberează conducătorul auto de sarcini secundare, care altfel ar necesita atenție vizuală și manuală, fapt ce reduce semnificativ riscul de distragere a atenției. În cazul navigației, pasagerul poate interpreta indicațiile GPS în timp real și le poate transmite conducătorului auto într-un mod adaptat situației.

Sprijin vizual lateral

Având un câmp vizual similar cu cel al conducătorului auto, pasagerul din față poate ajuta la verificarea unghiurilor moarte sau la observarea traficului transversal, în special în intersecții sau la depășiri. Cu toate acestea, informațiile transmise trebuie să fie clare, sincronizate și validate de conducător, pentru a evita erori sau conflicte decizionale.

Influențarea comportamentului decizional

Pasagerii pot influența direct modul în care conducătorul auto abordează anumite manevre: de la încurajări pozitive („ai timp să intri”) până la presiuni nocive („grăbește-te, nu vine nimeni”). Studiile arată că presiunea socială percepută din partea pasagerilor este un predictor al conducerii agresive, în special în rândul tinerilor.

Influența asupra atenției și vitezei de reacție

Pasagerii pot acționa ca surse de distragere (prin conversații, gesturi, telefoane, muzică), afectând timpul de reacție și capacitatea de a detecta stimuli rutieri esențiali. Distragerile sunt amplificate când pasagerul este agitat, critic sau intruziv în deciziile de conducere. De asemenea, există o legătură clară între nivelul de stres resimțit și performanța în sarcinile de conducere.

Intervenția în situații de urgență

În cazuri de urgență rutieră (accident, pierdere de conștiință, pană), pasagerul poate interveni prin apel la 112, poziționarea triunghiului reflectorizant, sprijin în acordarea primului ajutor. De aceea, minima instruire a pasagerilor este recomandată, în special în transportul familial.

Factori de confort și climat emoțional

Pasagerul contribuie la crearea unei atmosfere generale în vehicul. Muzica, climatizarea, tonul conversațiilor și limbajul nonverbal influențează nivelul de confort emoțional al conducătorului auto. Într-un climat armonios, atenția și controlul emoțional sunt îmbunătățite. În schimb, conflictele sau conversațiile tensionate pot conduce la reacții impulsive și scăderea calității decizionale.

Diferențierea în funcție de relația personală

Comportamentul conducătorului auto este modificat în funcție de relația cu pasagerul. În prezența copiilor sau a partenerului de viață, se observă o reducere a comportamentului riscant, în timp ce prietenii sau colegii pot genera o creștere a asumării de riscuri. Această variație subliniază influența psihosocială indirectă a pasagerului.

Adaptabilitate situațională

Pasagerii empatici își adaptează discursul și comportamentul la contextul rutier (ex: păstrează tăcerea când traficul e intens). Cei mai puțin adaptați pot contribui la erori de percepție, întârziere decizională sau reacții nepotrivite, mai ales în condiții meteo nefavorabile sau trafic urban aglomerat.

6.3. Analiza caracteristicilor și influenței pasagerilor din spate

Pasagerii de pe bancheta din spate reprezintă o componentă adesea subevaluată în analiza factorului uman în trafic, însă influența lor indirectă asupra comportamentului conducătorului auto este semnificativă, în special în condiții de trafic urban sau în cazul transportului familial. Deși acești pasageri nu interacționează direct cu manevrele de conducere, prezența, comportamentul și solicitările lor pot avea un impact notabil asupra atenției, dispoziției și capacității de reacție a conducătorului auto.

În transportul cotidian, pasagerii din spate includ atât adulți, cât și copii, iar fiecare categorie implică tipologii diferite de influențe: de la conversații active, cerințe legate de confort, până la zgomote, mișcări bruște sau manifestări neprevăzute (ex: plânsul sau agitația copiilor). Spre deosebire de pasagerul din dreapta, care poate comunica eficient și poate percepe contextul rutier, pasagerii din spate au o percepție limitată a drumului, fapt ce poate genera reacții nepotrivite în momente critice.

Prezența copiilor pe bancheta din spate introduce o serie de responsabilități și constrângeri suplimentare pentru conducătorul auto. Asigurarea confortului termic, verificarea fixării centurilor sau a scaunului special, gestionarea nevoilor fiziologice ori a solicitărilor emoționale (plictiseală, frustrare) implică o încărcare cognitivă suplimentară care poate duce la distragere vizuală, auditivă și chiar manuală, cu efecte negative directe asupra timpului de reacție.

În situațiile în care copilul este agitat, plânge sau are o criză emoțională, conducătorul auto se vede adesea nevoit să își întoarcă privirea, să intervină verbal sau chiar fizic (în cazuri periculoase), ceea ce echivalează cu perioade scurte de conducere „în orb”, comparabile cu efectele unei conversații intense sau utilizării unui telefon mobil. Cercetările evidențiază că prezența copiilor mici pe bancheta din spate este asociată cu o creștere semnificativă a frecvenței comportamentelor de distragere a atenției în rândul conducătorilor auto, nivelul acestora fiind de până la opt ori mai ridicat comparativ cu situațiile fără pasageri copii.

În mod specific, scaunele speciale pentru copii, deși sunt esențiale pentru siguranța pasivă, pot deveni surse de preocupare activă: monitorizarea fixării, verificarea poziției capului copilului, a somnului sau a comportamentului în timpul deplasării. În lipsa unei oglinzi retrovizoare suplimentare sau a sistemelor video integrate, aceste verificări se fac adesea prin întoarcerea repetată a capului, reducând capacitatea de anticipare a pericolelor.

Adulții aflați în spate, deși mai puțin dependenți, pot deveni surse de perturbare prin solicitări constante, utilizarea de dispozitive electronice cu volum ridicat, convorbiri telefonice sau alte comportamente necooperante (ex: ridicat brusc în picioare, înclinarea scaunului, gesturi exagerate). Aceste comportamente nu doar că generează zgomot și vibrații neplăcute, ci induc o stare generală de agitație care poate compromite fluența decizională a conducătorului auto.

Pasagerii din spate pot genera și influențe afective: critici, nemulțumiri sau emoții negative legate de trafic, rută sau condițiile de drum. Acest tip de comunicare poate afecta tonusul psihologic al conducătorului, care, în încercarea de a-și menține controlul emoțional, poate ignora stimuli rutieri importanți sau poate deveni impulsiv în trafic.

În plus, există și cazuri particulare în care pasagerii din spate, în special tinerii sau adolescenții, manifestă comportamente de „dominare socială” în vehicul, ceea ce poate duce la o presiune indirectă asupra stilului de conducere (ex: viteze mai mari, schimbări de bandă frecvente, evitarea opririlor). Conducătorii auto, în special cei tineri, pot fi mai predispuși să cedeze acestor presiuni din dorința de a se conforma așteptărilor sociale ale grupului.

Factorul de confort general este de asemenea relevant: ventilația, temperatura, nivelul de zgomot, accesul la apă sau mâncare, toate pot fi surse de solicitări către conducător. Deși par detalii minore, în mod cumulativ, ele devin factori perturbatori semnificativi în trafic intens sau pe trasee lungi.

Există și beneficii potențiale pentru că pasagerii din spate pot detecta anomalii sonore sau comportamentale ale autovehiculului (zgomote neobișnuite, mirosuri de arsură, scurgeri) sau pot interveni în situații de urgență, dacă sunt instruiți corespunzător. Aceste contribuții sunt însă rare și depind de nivelul de implicare, maturitate și conștientizare a rolului în siguranța rutieră.

Din perspectiva factorului uman, pasagerii din spate sunt entități dinamice, cu potențial perturbator latent, care pot deveni surse de risc atunci când interacțiunile nu sunt reglementate prin rutine clare și echipamente corespunzătoare. În special în mediul urban, unde manevrele sunt frecvente și imprevizibilitatea este mare, orice perturbare din habitacul poate deveni critică.

Comportamentul copiilor în scaune speciale

Influențe prin zgomot și plâns

Copiii mici produc deseori manifestări sonore necontrolate (plâns, țipete), care au un impact auditiv și emoțional negativ asupra conducătorului. Aceste reacții pot apărea chiar în momente critice (depășiri, intersecții), distrăgând atenția exact atunci când este nevoie de concentrare maximă.

Necesitatea de intervenție fizică

În lipsa unei persoane adulte suplimentare în vehicul, conducătorul auto poate fi tentat să se întoarcă fizic sau să întindă mâna către bancheta din spate, pentru a calma copilul. Aceste mișcări compromit temporar controlul volanului, echivalent cu momente de conducere „cu ochii închiși”.

Utilizarea oglinzilor retrovizoare auxiliare

O soluție tehnologică eficientă o reprezintă oglinzile retrovizoare auxiliare sau camerele de monitorizare pentru copii, care permit supravegherea vizuală fără deturnarea completă a privirii. Este recomandat ca aceste sisteme să fie integrate ergonomic în consola centrală, pentru a minimiza timpul de reacție.

Perturbarea controlului climatizării și a ritmului de mers

Copiii influențează indirect și gestionarea resurselor de confort (temperatură, ventilație, lumină), ceea ce duce la intervenții frecvente asupra comenzilor. Conducătorul auto trebuie să ajusteze aceste sisteme, crescând sarcina cognitivă și reducând timpul de reacție la stimuli externi.

6.4. Analiza caracteristicilor și influenței bicicliștilor

Bicicliștii sunt participanți la traficul rutier urban și periurban, a căror prezență influențează semnificativ dinamica circulației, siguranța rutieră și proiectarea infrastructurii. Întrucât bicicleta este un mijloc de transport nemotorizat, biciclistul acționează simultan ca vehicul și ca pieton extins, asumându-și responsabilități și riscuri specifice în cadrul sistemului rutier.

Comparativ cu conducătorii auto, bicicliștii sunt mult mai expuși factorilor externi, deoarece nu beneficiază de protecție structurală, iar manevrele de evitare a pericolelor sunt limitate de stabilitatea vehiculului cu două roți. Această vulnerabilitate impune o analiză detaliată a comportamentului uman specific acestei categorii, din perspectiva simțurilor fizice și psihice, atenției, vitezei de reacție, dar și a conformării la reguli.

Simțurile biciclistului, în special cel vizual și auditiv, are un rolul de a detecta pericolele din trafic. Vizibilitatea redusă în intersecții sau unghiuri moarte, asociată cu lipsa semnalizării sonore din partea vehiculului propriu, face ca biciclistul să fie adesea „invizibil” pentru alți participanți la trafic. Aceasta conduce la o serie de accidente frecvente, în special în zonele urbane aglomerate sau pe timp de noapte.

În plan psihic, atenția biciclistului trebuie distribuită constant între carosabil, obstacole, semne de circulație și comportamentul altor vehicule. Spre deosebire de conducătorii auto, care pot delega o parte din percepția senzorială către senzori sau sisteme automate, biciclistul se bazează exclusiv pe reacțiile sale rapide și intuiția dobândită prin experiență.

Viteza de reacție a unui biciclist este influențată de numeroși factori: vârsta, condiția fizică, nivelul de oboseală și gradul de familiaritate cu traseul. Studiile arată că timpul mediu de reacție pentru un adult sănătos pe bicicletă este de aproximativ 0,75 secunde, dar poate crește cu 30–40% în condiții de stres sau oboseală.

Din punct de vedere al comportamentului decizional, bicicliștii adoptă strategii variate în funcție de tipul infrastructurii, de la evitarea completă a benzilor comune cu autovehiculele, până la integrarea activă în fluxul de trafic. În lipsa pistelor dedicate, deciziile de traversare, schimbare de direcție sau oprire sunt luate adesea spontan, ceea ce poate induce incertitudine în comportamentul celorlalți participanți.

Motivațiile bicicliștilor variază de la deplasări recreaționale la transportul zilnic spre locul de muncă, aspect care influențează direct stilul de conducere, astfel că un ciclist sportiv adoptă o viteză mai mare, dar și o poziționare mai agresivă în trafic, pe când un utilizator de bicicletă obișnuit preferă trasee mai lente și evită intersecțiile aglomerate.

Comunicarea în trafic este una dintre provocările majore pentru bicicliști, care nu dispun de semnale sonore (ex. claxon) sau vizuale standardizate (ex. lumini de semnalizare) comparabile cu cele ale autovehiculelor. Astfel, comunicarea non-verbală, semnele cu mâna, contactul vizual, gesturile, devine un canal principal de transmitere a intențiilor.

Un alt aspect este adaptabilitatea bicicliștilor la condițiile meteo și de drum. În caz de ploaie, vânt puternic sau temperaturi extreme, controlul bicicletei devine mai dificil, frânarea este afectată, iar vizibilitatea scade. Astfel, factorii fizici devin amplificatori ai riscurilor de perturbare a fluxurilor de trafic.

Respectarea legislației rutiere de către bicicliști este adesea problematică. În lipsa unor cursuri obligatorii sau a unei licențe de conducere, mulți utilizatori de biciclete nu cunosc regulile de prioritate, semnalizare sau comportament în sens giratoriu, ceea ce creează un potențial conflict permanent cu fluxul motorizat.



Figura 6.2. Utilizarea bicicletei corect, pe pista dedicată

Interacțiunea biciclistului cu infrastructura ITS este limitată. Deși unele orașe din lume au început să instaleze semafoare dedicate sau contoare de biciclete, în majoritatea cazurilor, ITS-ul este orientat spre vehiculele motorizate, lăsând biciclistul în afara sistemului inteligent.

Confortul biciclistului este afectat de starea carosabilului, prezența bordurilor, gropilor sau trecerilor nesemnalizate. Acestea obligă la abateri bruște de la traiectorie, cu risc crescut de coliziuni laterale, în special în zonele unde banda de rulare este comună cu autovehiculele.

Astfel că, bicicliștii sunt o categorie a factorului uman care necesită o abordare specifică, bazată pe înțelegerea vulnerabilităților, a interacțiunilor complexe cu mediul urban și a limitărilor cognitive și senzoriale proprii. Integrarea lor corectă în modelele de trafic este importantă pentru siguranța și sustenabilitatea mobilității urbane.

Interacțiunea bicicliștilor cu infrastructura rutieră și ceilalți participanți la trafic

Tipuri de infrastructură dedicate și partajate

Bicicliștii pot circula pe patru tipuri de infrastructură rutieră, fiecare influențând în mod distinct comportamentul acestora:

- Piste dedicate pentru biciclete (izolate de carosabil, cu marcaje proprii)
- Benzi pentru biciclete (marcate pe partea carosabilă, în trafic mixt)
- Zone partajate cu autovehicule (drumuri urbane fără facilități speciale)
- Zone pietonale cu acces permis bicicletelor (ex. trasee prin parcuri)

Fiecare configurație determină o adaptare a strategiei de deplasare, a vitezei și a gradului de vigilență. Lipsa unei infrastructuri coerente și continue duce frecvent la comportamente riscante precum traversări ilegale, rulare pe trotuar, evitarea semafoarelor etc.

Puncte de conflict infrastructural frecvente

Cele mai riscante zone pentru bicicliști sunt:

- Intersecțiile nesemaforizate, unde vehiculele motorizate au dificultăți în a anticipa intențiile biciclistului.
- Ieșirile din parcuri și curți laterale, unde bicicliștii sunt adesea în unghi mort.
- Trecherile de pietoni adiacente pistelor, unde pietonii pot invada brusc spațiul bicicletei.
- Zonele de încadrare pentru viraje la stânga, unde biciclistul trebuie să traverseze fluxul auto.

Identificarea zonelor de conflict reprezintă un element central în analizele de siguranță rutieră, iar literatura de specialitate indică drept măsuri eficiente introducerea fazelor semaforizate distincte pentru bicicliști și configurarea intersecțiilor cu insule de protecție destinate acestora.

Interacțiunea cu conducătorii auto

Bicicliștii se confruntă adesea cu comportamente agresive din partea conducătorilor auto: claxonare excesivă, depășiri periculoase, „tăierea” traiectoriei la schimbarea benzii sau neacordarea priorității în sensuri giratorii.

Motivele includ:

- Subestimarea vitezei reale a biciclistului
- Vizibilitate redusă (bicicleta nu este percepută ca participant legitim)
- Lipsa de educație rutieră privind drepturile bicicliștilor

Pentru reducerea conflictelor între autovehicule și bicicliști, numeroase state europene au introdus reglementări privind distanța laterală minimă la depășire, de regulă 1,5 m, măsură promovată și la nivelul politicilor de siguranță rutieră.³²

Interacțiunea cu pietonii

În zonele mixte, bicicliștii trebuie să își adapteze comportamentul pentru a preveni coliziunile cu pietonii.

Probleme tipice întâmpinate sunt:

³² European Cyclists' Federation, „Road Safety: Safe Lateral Passing Distances.” Disponibil la <https://www.ecf.com/en/news/road-safety-safe-lateral-passing-distances>. Accesat la data de 15.12.2025.

- Viteze mari pe trotuare înguste
- Traversări prin treceri de pietoni fără coborârea de pe bicicletă (obligatorie legal)
- Aglomerație pietonală în orele de vârf (ex: ieșire din metrou)

Educația utilizatorilor și semnalizarea corectă a zonelor de coabitare (pictograme, semne verticale, stâlpi despărțitori) sunt esențiale pentru siguranța comună.

Rolul infrastructurii inteligente (ITS)

Majoritatea sistemelor ITS (ex: semafoare adaptive, panouri) sunt calibrate pentru vehicule motorizate.

Cu toate acestea, se implementează tot mai des:

- Semafoare cu senzor inductiv pentru bicicliști (activare automată fără buton)
- Detectoare radar de numărare biciclete (fluxuri, ore de vârf)
- Semnalizare dinamică pentru piste temporare în caz de lucrări

Aceste soluții permit integrarea mai bună a bicicliștilor în modele de simulare și decizie urbană (ex. în aplicațiile Aimsun, PTV Vissim sau SUMO).

Vizibilitatea și echiparea bicicliștilor

Un factor de interacțiune este vizibilitatea activă și pasivă:

- Activă: lumini față/spate, semnale de frânare, reflectoare pe spițe
- Pasivă: vesta reflectorizantă, cască colorată, îmbrăcăminte fluorescentă

Influența asupra fluxurilor de trafic și a modelelor

Bicicliștii influențează:

- Viteza medie pe segmente cu trafic mixt
- Capacitatea benzilor, mai ales în condiții de depășire frecventă
- Timpul de semaforizare, dacă sunt incluși în ciclurile luminoase

În modelele macroscopice, bicicliștii pot fi tratați prin coeficienți de echivalare (ex: 0,3 – 0,5 Vehicule etalon), dar în zonele urbane dense se recomandă modelare dedicată (ex. microsimulare).

6.5. Analiza caracteristicilor și influenței utilizatorilor de trotinete electrice

În ultimii ani, trotinetele electrice au devenit o formă populară de mobilitate urbană, în special în marile aglomerări, fiind percepute ca un mijloc eficient, rapid și ecologic de deplasare pe distanțe scurte. Această categorie de utilizatori este una dintre cele mai vulnerabile în trafic, având un nivel redus de protecție, o siluetă redusă, lipsa dotărilor pasive de siguranță și o capacitate de frânare limitată. Din punctul de vedere al factorului uman, utilizatorul de trotinetă

electrică este adesea un participant insuficient pregătit pentru mediul rutier, cu competențe reduse în anticiparea riscurilor și interacțiunea cu fluxul rutier complex.

Utilizatorii de trotinetă operează vehicule cu accelerație bruscă și manevrabilitate ridicată, dar cu un centru de greutate instabil și o sensibilitate crescută la denivelări, borduri sau materiale alunecoase (pavaj umed, gropi, linii de tramvai etc.). Acești factori implică o solicitare constantă a echilibrului și a coordonării motorii fine. Majoritatea trotinetelor electrice au roți mici (sub 20 cm diametru), fapt care reduce considerabil capacitatea de absorbție a șocurilor și contribuie la instabilitate în condiții dificile.

Din punct de vedere vizual, utilizatorii de trotinetă se încadrează într-un registru vulnerabil, având o înălțime redusă față de câmpul vizual al conducătorilor auto. Ei pot deveni invizibili în oglinzile laterale, în unghiurile moarte ale vehiculelor mari (ex. autobuze, camionete) sau în zonele cu iluminat urban slab. De asemenea, mișcările bruște, trecerile rapide între trotuar și carosabil sau evitarea obstacolelor prin schimbări bruște de direcție cresc imprevizibilitatea comportamentală.

Auditiv, utilizatorii de trotinetă beneficiază de un mediu relativ liniștit, întrucât vehiculul nu produce zgomot propriu semnificativ. Totuși, această liniște funcționează și invers: ceilalți participanți la trafic nu percep acustic apropierea trotinetei, ceea ce crește riscul de coliziune, în special pentru pietoni sau bicicliști. În plus, utilizarea căștilor audio de către utilizatorii de trotinete reduce capacitatea de detecție auditivă a riscurilor externe (sirene, claxoane, motoare apropiate etc.).

Kinestezic, utilizatorii de trotinete sunt într-o stare de echilibru permanent precară. Spre deosebire de bicicliști, care au o poziție mai stabilă și un cadru rigid, cei de pe trotinete trebuie să își adapteze permanent postura, în funcție de viteza de rulare, condițiile suprafeței de drum și manevrele necesare. Orice frânare bruscă sau accelerare intempestivă poate conduce la dezechilibru și cădere, mai ales la viteze peste 20 km/h.

Din punct de vedere psihic, utilizatorii de trotinetă prezintă o diversitate mare: de la utilizatori ocazionali sau turistici, fără experiență, până la navetiști obișnuiți. Nivelul de vigilență, atenția distributivă și viteza de reacție variază semnificativ. Unii utilizatori pot manifesta comportamente riscante, bazate pe sentimentul de nereglementare sau neînregistrare, în lipsa unui cadru legislativ perceput ca strict. De asemenea, utilizatorii tineri pot avea o supraevaluare a propriilor abilități și o subestimare a riscurilor reale.

Motivația utilizării trotinetei electrice ține de nevoia de mobilitate rapidă, evitare a ambuteiajelor, lipsa parcării și ușurința de transport al vehiculului (pliabil, ușor). Totuși, această comoditate poate duce la decizii inadecvate, cum ar fi rularea pe trotuare aglomerate, traversarea nereglementară a intersecțiilor sau ignorarea semaforizării.

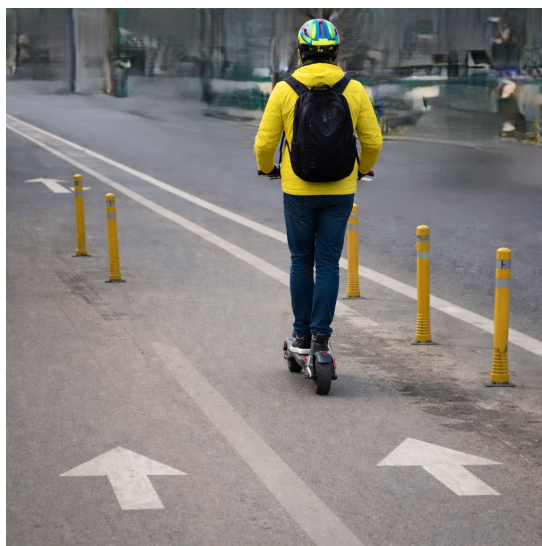


Figura 6.3. Exemplu de utilizare corectă a trotinetei pe pista pentru biciclete

Comportamentul utilizatorilor de trotinete în raport cu legislația rutieră este adesea slab corelat cu normele Codului Rutier. Deși Codul Rutier a fost modificat în 2021, în România, pentru a include trotinetele electrice (ex: limita minimă de vârstă 14 ani, obligativitatea purtării căștii sub 16 ani), aplicarea practică este redusă. Multe persoane nu conștientizează că trotineta este un vehicul și că implică responsabilități legale în trafic.

Interacțiunea cu autoritățile este încă incipientă. Rareori se aplică sancțiuni, iar percepția publică este că trotineta este un mijloc „liber” de control. Aceasta slăbește conformitatea comportamentală, în special în ceea ce privește circulația pe drumurile publice, semnalizarea direcției de mers sau respectarea benzilor dedicate.



Figura 6.4. Exemplu de utilizare incorectă a trotinetei, pe partea carosabilă

Sistemele ITS rareori iau în calcul trotinetele electrice ca entități active în rețea. Lipsa senzorilor dedicați, absența pistei în hărțile digitale sau nesincronizarea cu semaforizarea inteligentă lasă acești utilizatori în afara sistemelor de optimizare urbană. În multe orașe, doar proiectele pilot sau aplicațiile private integrează trotinetele în platforme de monitorizare a mobilității urbane.

Detectarea utilizatorilor de trotinete electrice în trafic

Provocări legate de semnătura fizică

Trotinetele electrice au o siluetă foarte redusă atât în înălțime, cât și în lățime, ceea ce le face greu de detectat de către radarele convenționale, mai ales cele calibrate pentru autovehicule sau motociclete. Aceste echipamente radar utilizează reflexii de undă electromagnetică pentru a determina prezența, distanța și viteza obiectelor.

În cazul trotinetelor:

- Suprafața reflectantă este mică (comparabilă cu un pieton);
- Materialele folosite (plastic, aluminiu ușor, cauciuc) nu reflectă undele radar eficient;
- Vitezele reduse (<25 km/h) sunt adesea sub pragul de detecție al radarelor de viteză reglate pentru vehicule (>30 km/h).

Ca urmare, multe radare rutiere, inclusiv cele utilizate de poliția rutieră, nu înregistrează corect trotinetele electrice, omițându-le complet sau interpretându-le eronat drept pietoni.

Camere video și analiză computerizată (*video analytics*)

Sistemele moderne de detecție video bazate pe inteligență artificială și *machine learning* pot detecta trotinetele electrice cu o precizie mult mai mare, în special în zonele urbane supravegheate.

Acestea funcționează pe bază de clasificare de formă, mișcare și comportament:

- Prin antrenarea rețelelor neuronale (ex: YOLOv8, TensorFlow Object Detection) pentru recunoașterea trotinetelor;
- Cu posibilitatea de a distinge între biciclete, motociclete, pietoni și trotinete, inclusiv în condiții de lumină scăzută;
- Prin corelare cu hărți termice de mobilitate sau fluxuri de date urbane (ex: aplicații de închiriere).

Limitările apar în cazul supraaglomerării vizuale, în condiții meteo nefavorabile (ploaie, ceață) sau când utilizatorii circulă pe trotuare, spații verzi sau în afara perimetrului camerei. De

asemenea, în multe orașe, camerele video urbane nu sunt calibrate pentru detecția unor obiecte mici și rapide, iar integrarea acestor date în sistemele ITS este incipientă.

Bucle inductive și detecție clasică prin senzori

Buclele inductive încastrate în carosabil (senzori metalici sub asfalt) sunt calibrate să detecteze mase metalice mari, tipice pentru autovehicule sau camioane.

Trotinetele electrice:

- Nu au suficient material feromagnetic pentru a activa bucla;
- Nu pot fi distinse de pietoni dacă sunt împinse sau transportate manual;
- Pot duce la rezultate eronate în intersecții semaforizate automate (care se activează la detecție de vehicul).

Concluzia este că buclele inductive nu sunt adecvate pentru detectarea trotinetelor și nu pot furniza date fiabile privind fluxul acestora în rețea.

Tehnologii emergente și IoT

Pentru un control mai precis, unele orașe (ex. Paris, Tel Aviv, Viena) testează integrarea trotinetei în rețea prin:

- Senzori GPS integrați în trotinetele închiriate;
- Module IoT care transmit în timp real poziția, viteza, starea bateriei;
- Soluții de *geofencing*, ce limitează viteza în anumite zone (ex: parcuri, școli).

Aceste soluții sunt eficiente doar pentru trotinetele din flotele comerciale (Lime, Bolt etc.). Trotinetele personale, neechipate cu astfel de sisteme, rămân în mare parte invizibile pentru rețelele de detecție ITS.

Probleme de standardizare și integrare în modele de trafic

Un alt obstacol este lipsa standardizării datelor privind trotinetele:

- Modelele macroscopice de trafic (ex. VISSIM, AIMSUN, PTV) nu au, în mod nativ, clase dedicate pentru trotinete;
- Majoritatea bazelor de date de trafic nu includ fluxuri de trotinete, ceea ce afectează acuratețea prognozelor și planificarea infrastructurii (ex: piste dedicate, semnalizare);
- În sistemele de semaforizare adaptivă, lipsa detecției corecte duce la inechitate în alocarea timpilor de verde, ceea ce crește riscul de comportament riscant (traversări neregulamentare, slalom între benzi).

Detectarea trotinetelor electrice în trafic rămâne o provocare tehnologică și instituțională. Soluțiile radar tradiționale sunt ineficiente, iar integrarea în sisteme video inteligente necesită investiții, standarde și interoperabilitate.

În lipsa acestor măsuri, trotinetele electrice vor continua să circule în afara „vizibilității oficiale”, afectând acuratețea modelelor de trafic și reducând eficiența măsurilor de siguranță. Este necesar un efort comun între autorități, dezvoltatori de infrastructură ITS și operatori de mobilitate urbană pentru a oferi acestor utilizatori un loc clar și sigur în rețeaua rutieră.

6.6. Analiza caracteristicilor și influenței pietonilor – Participanți vulnerabili și factori activi în dinamica traficului rutier

Pietonii reprezintă una dintre cele mai vulnerabile categorii de participanți la traficul rutier, fiind implicați frecvent în accidente cu consecințe grave sau fatale, mai ales în mediul urban aglomerat. Din punctul de vedere al ingineriei traficului, pietonii nu sunt doar utilizatori ai infrastructurii pasive (trotuare, treceri de pietoni), ci entități dinamice, imprevizibile, care interacționează constant cu fluxurile de vehicule, semnalizarea rutieră și elementele mediului construit.

Prezența pietonilor afectează în mod direct configurația geometrică a intersecțiilor, timpii de semaforizare, nivelurile de serviciu (LOS) și capacitatea de circulație. În multe cazuri, prioritizarea pietonilor impune reduceri de viteză, introducerea de insule de refugiu sau chiar restricționarea accesului autovehiculelor în anumite zone (zone *shared space* sau pietonizate).

Simțurile fizice ale pietonilor joacă un rol în siguranța lor. Vederea periferică, capacitatea de a percepe distanțele și direcția de deplasare a vehiculelor, auzul traficului și reacția la stimuli vizuali (culori semafor, lumini de frână) influențează comportamentul lor de traversare. În special copiii și persoanele vârstnice au limitări fiziologice și cognitive care le reduc capacitatea de anticipare a pericolelor.

Simțurile psihice, precum atenția distributivă, capacitatea de concentrare și reglarea impulsurilor, determină nivelul de risc pe care un pieton și-l asumă în momentul traversării. Pietonii distrași de telefoane mobile, căști audio sau conversații tind să evalueze greșit timpul disponibil pentru traversare, ceea ce crește exponențial probabilitatea de impact cu un autovehicul.

O categorie aparte o reprezintă pietonii vulnerabili: copiii sub 10 ani, persoanele cu dizabilități locomotorii, persoanele în vârstă și utilizatorii de dispozitive de asistență (cadre de mers, bastoane, scaune rulante). Aceștia necesită infrastructură adaptată: rampe, semafoare cu temporizare extinsă, semnalizare acustică și marcaje tactile.

Pietonii contribuie activ și la comunicarea informală în trafic – prin contact vizual cu conducătorii auto, gesturi de mulțumire, semnale non-verbale care influențează deciziile acestora (de ex.: oprirea sau continuarea traversării). Această interacțiune directă, greu de cuantificat matematic, are un rol esențial în fluidizarea sau blocarea punctuală a traficului.

Din punct de vedere al detectabilității, pietonii sunt cel mai bine observați de sistemele ITS bazate pe camere video și algoritmi de recunoaștere de tip *deep learning*. Spre deosebire de trotinete sau biciclete, mișcarea caracteristică bipedă a pietonului este ușor de identificat și segmentat chiar și în condiții de iluminare slabă.

În plan normativ, pietonii beneficiază de protecție prioritară în Codul Rutier și în Convenția de la Viena (reglementările internaționale privind circulația rutieră), dar realitatea infrastructurii este adesea deficitară: treceri nesemaforizate, trotuare înguste, pasaje subterane inaccesibile pentru persoane cu dizabilități, sau conflicte de utilizare cu bicicliști sau utilizatori de trotinete.

Din perspectivă urbanistică, fluxurile pietonale sunt integrate în modelele de mobilitate durabilă (SUMP – *Sustainable Urban Mobility Plan*), care promovează mobilitatea activă și reducerea dependenței de autovehicul. Astfel, datele de trafic pietonal devin esențiale pentru dimensionarea intersecțiilor, planificarea stațiilor de transport public și optimizarea accesibilității pietonale.

Un aspect emergent este analiza comportamentală a pietonilor în funcție de context socio-cultural. De exemplu, pietonii din Europa Centrală tind să respecte cu strictețe culoarea semaforului, în timp ce în sudul Europei există o toleranță mai mare la traversările neregulate, ceea ce trebuie reflectat în modele comportamentale diferențiate.

Condițiile climatice influențează și ele comportamentul pietonilor: în condiții de ploaie sau ninsoare, pietonii reduc timpul de așteptare și sunt mai predispuși să traverseze neregular. În același timp, scade și vizibilitatea lor pentru conducătorii auto, ceea ce ridică nivelul de risc.

Pe termen lung, integrarea infrastructurii pietonale sigure și accesibile are beneficii multiple: reducerea accidentelor, promovarea sănătății populației, scăderea emisiilor de carbon și creșterea atractivității zonelor urbane. Prin urmare, pietonii nu trebuie priviți ca un element pasiv, ci ca o verigă critică în ansamblul sistemului de trafic.

Un model de analiză completă a pietonilor presupune măsurarea fluxurilor în puncte cheie, observarea comportamentului lor în intersecții și modelarea interacțiunilor cu vehiculele și infrastructura. Astfel, se pot propune intervenții bazate pe date, cu impact direct asupra siguranței rutiere și mobilității urbane.

Simțurile fizice ale pietonului în context rutier

Vederea

Vederea este principalul canal senzorial prin care pietonul percepe mediul rutier.

Aceasta include:

- vederea centrală (pentru recunoașterea detaliilor: semafoare, vehicule, treceri de pietoni),
- vederea periferică (pentru anticiparea vehiculelor din lateral),
- percepția adâncimii și a vitezei relative (critică în evaluarea timpului necesar pentru traversare).

În condiții de iluminare scăzută, acuitatea vizuală scade, iar percepția vehiculelor fără luminile aprinse devine deficitară. De aceea, se recomandă iluminatul public accentuat în zonele de traversare.

Auzul

Auzul permite detectarea autovehiculelor chiar și în afara câmpului vizual. Pietonii folosesc auzul pentru:

- localizarea sursei sonore (motor, frânare),
- estimarea distanței și vitezei unui vehicul,
- perceperea semnalelor de avertizare (claxoane, sirene).

Totuși, folosirea căștilor audio diminuează drastic acest simț, crescând riscul deciziilor greșite la traversare.

Mirosul

Mirosul are un rol secundar în trafic, dar contribuie la percepția subiectivă a calității mediului. Mirosul de combustibil sau de frână încinsă poate genera un răspuns de evitare sau de grabă, influențând decizia pietonului de a traversa sau nu.

Kinestezia (propriocepția)

Capacitatea de a percepe poziția corpului în spațiu influențează mersul pe jos în condiții de trafic aglomerat, traversarea în fugă sau manevrele bruște. Vârșnicii și copiii mici au o propriocepție mai slab dezvoltată, ceea ce le reduce capacitatea de reacție în situații limită.

Simțurile psihice ale pietonului

Atenția

Atenția pietonului este o resursă cognitivă limitată. În medii aglomerate, zgomotoase sau complexe vizual, atenția devine distribuită și poate lipsi exact când este necesară. Distragerile – telefoane mobile, reclame digitale, conversații – duc la decizii greșite de traversare.

Viteza de reacție

Timpul de reacție al pietonului între observarea unui pericol și inițierea mișcării este influențat de:

- vârstă,
- stare fizică (oboseală, consum de alcool sau medicamente),
- nivelul de stres,
- multitasking (folosirea telefonului în mers).

Pietonii tineri (sub 25 ani) și vârstnicii (peste 65 ani) au timpi de reacție mai mari decât media populației.

Judecata și evaluarea riscului

Pietonii evaluează subiectiv distanțele și viteza vehiculelor – o capacitate ce poate fi alterată de:

- anxietate,
- presiune socială (dacă alți pietoni traversează, chiar neregulamentar),
- lipsa de experiență (copiii mici nu percep corect viteza unui vehicul).

Interacțiunea pietonilor cu vehiculele

Pietonii influențează permanent fluxul rutier, chiar și în moduri indirecte. Exemple:

- Trecherile de pietoni semaforizate impun oprirea vehiculelor la intervale regulate, afectând debitul.
- Traversările neregulamentare generează frânări de urgență, accidente sau ambuteiaje spontane.
- Zonele pietonale sau *shared-space* creează o dinamică specială în care conducătorii auto trebuie să adopte o conduită preventivă și fluidă.

Comunicarea non-verbală între pieton și conducătorul auto este critică: contactul vizual, ridicarea mâinii sau poziționarea clară pe bordură pot semnala intenția de traversare. Lipsa acestui contact poate duce la interpretări greșite și riscuri de coliziune.

Interacțiunea pietonilor cu infrastructura

Pietonii folosesc infrastructura dedicată, dar sunt sensibili la modul în care aceasta este:

- semnalizată (vizibilitatea marcajelor),
- întreținută (gropi, borduri înalte, obstacole),
- adaptată nevoilor speciale (rampe, semafoare acustice).

Un trotuar îngust sau o trecere de pietoni prost poziționată determină comportamente de traversare riscante. Lipsa unui refugiu median sau a iluminatului stradal poate transforma o zonă altfel sigură într-un punct negru rutier.

Detecția pietonilor în trafic și influența asupra fluxurilor rutiere

Identificarea corectă și în timp real a pietonilor în mediul rutier reprezintă un element-cheie pentru sistemele moderne de management al traficului și pentru siguranța participanților vulnerabili la trafic. Astăzi, tehnologiile utilizate pentru această detecție includ:

Camere video cu inteligență artificială (VCA – *Video Content Analysis*)

Acestea analizează înregistrările video în timp real, identificând conturul uman, tiparele de mișcare și intenția de traversare. Sistemele performante recunosc:

- poziția corporală (ex: înclinare înainte = pregătire pentru traversare),
- membrele (mâna ridicată semnalează intenție),
- direcția privirii (util în zonele de shared space).

Senzori cu infraroșu și LIDAR

Sunt utilizați în intersecții moderne și vehicule autonome. LIDAR-ul oferă o hartă 3D în timp real, detectând cu mare precizie siluetele pietonilor, distanța față de carosabil și traiectoria probabilă.

Radare cu microunde și senzori Doppler

Mai rar utilizați pentru pietoni, dar prezenți în unele semafoare adaptive. Ele detectează obiecte în mișcare și pot estima viteza de apropiere a unui pieton față de trecerea de pietoni.

d. Sisteme portabile și mobile (crowdsourcing și detecție colaborativă)

Datele GPS din aplicațiile de mobilitate (ex. Google Maps, Waze) pot furniza indirect informații despre concentrarea pietonilor în anumite zone. Deși nu sunt precise la nivel de individ, ajută la identificarea zonelor cu densitate ridicată pietonală.

Acuratețea detecției și problemele specifice

În ciuda progreselor tehnologice, detecția pietonilor rămâne problematică în anumite condiții:

- Pietoni mascați de obiecte (vehicule parcate, vegetație),
- Lipsa iluminatului public – camerele standard suferă o scădere majoră a preciziei pe timp de noapte,
- Vestimentația non-reflectorizantă sau umbrele proiectate de clădiri,
- Timpul de reacție al sistemelor – între detecție și acționarea unui semafor pietonal, pot apărea întârzieri critice.

Aceste limitări afectează eficiența sistemelor de semaforizare adaptivă sau a vehiculelor autonome în a evita coliziunile.

Impactul detecției pietonilor asupra fluxului rutier

Integrarea datelor de detecție pietonală în sistemele de control al traficului influențează semnificativ fluxul rutier:

Sisteme de semaforizare adaptivă

- Semaforul se comută automat pe roșu pentru vehicule doar când pietoni reali sunt prezenți în zona de traversare;
- Reduce timpii de așteptare inutili pentru vehicule și pietoni;
- Optimizează ciclurile semaforului, maximizând debitul rutier în perioadele fără traversări.

Sisteme AVAS (Sistemul de Avertizare Acustică a Vehiculelor) și vehicule autonome

Vehiculele autonome detectează pietonii și frânează automat. În zone cu densitate pietonală mare, acest comportament poate induce supra-frânări și scăderi drastice ale vitezei medii de circulație.

Zonare și planificare urbană

Datele colectate despre frecvența pietonilor în anumite zone determină:

- reconfigurarea infrastructurii (pasaaje subterane, refugii mediane, trotuare lărgite),
- aplicarea de măsuri de calmare a traficului (ex: bumpere, limitări 30 km/h),
- decizii privind interzicerea temporară a traficului auto (ex: în zonele centrale pietonale).

Exemple de implementare reală

- Barcelona (Spania) – Sistemul SMOU combină datele pietonale cu cele rutiere pentru optimizarea traseelor multimodale.
- Oslo (Norvegia) – a implementat detectoare pietonale cu infraroșu în toate trecerile de pietoni nesemaforizate, rezultând într-o scădere de 31% a accidentelor.
- Tokyo (Japonia) – folosește LiDAR și camere AI în intersecții pentru a adapta în timp real durata semafoarelor, reducând întârzierile pietonale cu 43%.

Detecția pietonilor nu este doar o componentă de siguranță, ci un instrument strategic în managementul inteligent al traficului urban. Corelarea în timp real a prezenței pietonilor cu controlul semafoarelor și fluxul vehiculelor conduce la:

- reducerea congestionării,
- creșterea siguranței participanților vulnerabili,
- și o mai bună coexistență între toate modurile de transport.

Modelarea comportamentală a pietonilor în contextul traficului rutier

Modelarea comportamentală a pietonilor este esențială în proiectarea și simularea sistemelor de trafic, în special în zonele urbane unde interacțiunea între pietoni și vehicule este frecventă și complexă. Spre deosebire de vehicule, comportamentul pietonilor este adesea mai puțin predictibil, afectat de factori multipli: intenție, percepție, urgență, aglomerație, atenție și reacție la stimulii din mediu.

Factori care influențează decizia de traversare

Pietonii iau decizia de a traversa strada în funcție de:

- Distanța și viteza vehiculului care se apropie – estimată vizual și auditiv;
- Lățimea drumului și existența marcajelor sau a insulelor de refugiu;
- Prezența altor pietoni care traversează simultan – efect de „turmă”;
- Semnalizarea rutieră – semafor pietonal, marcaje, indicatoare;
- Propria urgență/oboseală/stare psihologică;
- Starea vremii – ploaia sau frigul determină traversări mai rapide și mai riscante.

Modele matematice de simulare a comportamentului pietonal

Modelul de tip *Social Force*³³

Modelul presupune că deplasarea pietonilor poate fi modelată prin forțe sociale care descriu interacțiunile dintre indivizi și mediul construit:

- atracția către o destinație (ex: trotuar, ieșire),
- repulsia față de obstacole (vehicule, alți pietoni),
- forța de menținere a distanței personale.

Este ideal pentru simulări în mulțimi mari, evenimente, intersecții aglomerate.

*Agent-Based Models (ABM)*³⁴

Fiecare pieton este tratat ca un „agent” individual, cu decizii proprii și parametri variabili:

- reacție la trafic,
- atenție și timp de reacție,
- nivel de risc acceptat.

Permite simularea comportamentului realist, inclusiv al celor care traversează neregulamentar.

³³ Dirk Helbing și Péter Molnár, „Social Force Model for Pedestrian Dynamics,” *Physical Review E* 51, nr. 5, 1995: p. 4282-4286.

³⁴ Eric Bonabeau, „Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems,” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, supl. 3, 2002: p.7280–7281.

Parametri folosiți în simulare

- *Gap acceptance*: timpul minim acceptat de un pieton între două vehicule pentru a începe traversarea;
- *Start delay*: întârzierea dintre apariția unei oportunități de traversare și inițierea efectivă;
- *Walking speed*: viteza medie de deplasare ($\approx 1,2-1,5$ m/s pentru adulți sănătoși);
- *Crossing time*: timp total necesar pentru traversare.

Aceste variabile sunt integrate în software precum VISSIM, AIMSUN, PTV VISWALK, care simulează interacțiunea pietoni-vehicule în spații partajate.

Aplicații practice ale modelării comportamentale a pietonilor în ingineria traficului

Una dintre cele mai importante aplicații ale modelării pietonale este proiectarea și dimensionarea infrastructurii dedicate traversării. Trecherile de pietoni, insulele de refugiu și pasajele pietonale trebuie concepute pe baza comportamentului real al utilizatorilor, nu doar a unor valori normative ideale. Modelele comportamentale permit estimarea distribuției vitezelor de mers, a timpilor de reacție și a tendinței de traversare individuală sau în grup, elemente critice pentru siguranța rutieră.

Simularea fluxurilor pietonale în zone cu trafic intens permite evaluarea lășimii optime a trecerilor și a necesității insulelor mediane, mai ales pe arterele urbane cu mai multe benzi de circulație, unde pietonii preferă traversarea etapizată.

Optimizarea semaforizării și a controlului traficului pietonal

Modelarea comportamentului pietonal joacă un rol fundamental în optimizarea semaforizării intersecțiilor urbane. Timpii de traversare trebuie corelați cu viteza reală de deplasare, care variază semnificativ în funcție de vârstă, densitate și scopul deplasării.

Utilizarea unor viteze medii fixe poate conduce la situații periculoase, în care pietonii nu finalizează traversarea în timpul fazei verzi.

Modelele microscopice permit simularea traversărilor întârziate, a încălcării semnalizării și a comportamentului oportunist, informații esențiale pentru proiectarea fazelor dedicate pietonilor și a sistemelor de control adaptiv al traficului.

Studii de impact și evaluarea fluxurilor pietonale generate

În studiile de impact pentru centre comerciale, gări, terminale intermodale sau unități de învățământ, modelarea pietonală este indispensabilă pentru evaluarea interacțiunilor dintre fluxurile pietonale și cele vehiculare. Astfel de obiective generează fluxuri concentrate, cu comportament specific (grabă, deplasare în grup, bagaje), care influențează semnificativ siguranța și capacitatea rețelei rutiere.

Prin simulări microscopice, pot fi identificate punctele de conflict și zonele cu risc ridicat de aglomerare, permițând testarea mai multor scenarii de organizare a circulației înainte de implementarea fizică.

Integrarea pietonilor în dezvoltarea vehiculelor autonome

În contextul dezvoltării vehiculelor autonome, modelarea comportamentului pietonilor a devenit esențială pentru siguranța circulației urbane. Vehiculele autonome trebuie să anticipeze intențiile pietonilor, precum traversarea iminentă sau ezitarea, pentru a adopta strategii de conducere sigure. Modelele comportamentale sunt utilizate pentru antrenarea algoritmilor de inteligență artificială, transformând pietonii din obstacole pasive în agenți activi ai sistemului de trafic.

Influența comportamentului pietonal asupra performanței traficului rutier

Traversările frecvente și neanticipate ale pietonilor determină reduceri ale vitezei medii a vehiculelor și creșterea frecvenței frânărilor bruște, cu impact direct asupra siguranței și fluenței traficului. Debitele maxime orare sunt mai scăzute în zonele cu densitate pietonală ridicată, iar conflictele directe dintre pietoni și vehicule constituie una dintre principalele cauze ale accidentelor urbane.

Congestia la intersecții este adesea amplificată de traversările în afara fazei verzi, fenomen frecvent în zone comerciale și turistice, unde comportamentul pietonal este mai puțin conformist.

Pentru obținerea unor rezultate realiste, modelele pietonale ar trebui calibrate cu date reale provenite din observații directe, filmări sau senzori video.

Este importantă diferențierea pietonilor în funcție de sensibilitatea la risc, copiii și vârstnicii având comportamente distincte față de adulții activi, iar introducerea scenariilor stocastice crește robustețea simulărilor și permite evaluarea comportamentului variabil, în special în spațiile de tip *shared space*, unde regulile clasice de prioritate sunt estompate.

Încheiere

Prezentul volum a avut ca obiectiv principal analiza aprofundată a managementului traficului rutier dintr-o perspectivă integrată, care îmbină fundamentele teoretice ale traficului cu metodele moderne de observare, înregistrare și analiză a fluxurilor rutiere, precum și cu rolul tot mai important al tehnologiilor emergente și al factorului uman în dinamica sistemelor de transport. Abordarea propusă a urmărit să ofere o viziune coerentă și actualizată asupra modului în care traficul rutier poate fi înțeles, evaluat și gestionat eficient într-un context urban și interurban caracterizat de creșterea mobilității, diversificarea modurilor de transport și apariția unor provocări complexe legate de siguranță, sustenabilitate și eficiență.

Un prim element evidențiat îl reprezintă importanța cunoașterii aprofundate a componentelor fundamentale ale traficului rutier. Analiza tipologiei drumurilor publice, a factorilor determinanți ai traficului și a categoriilor legislative de vehicule a permis conturarea cadrului structural în care se desfășoară circulația rutieră. Standardizarea vehiculelor și a infrastructurii, precum și armonizarea reglementărilor la nivel național și european, constituie premise indispensabile pentru dezvoltarea unor sisteme coerente de management al traficului. În acest context, cadrul normativ nu reprezintă doar un set de constrângeri, ci un instrument fundamental pentru asigurarea siguranței, interoperabilității și predictibilității sistemului rutier.

A fost pus un accent deosebit pe metodele de observare și înregistrare a fluxurilor rutiere, evidențiind evoluția de la tehnicile clasice, bazate pe observații manuale și măsurători punctuale, către sisteme automate și inteligente de detecție. Analiza detaliată a senzorilor inductivi, a sistemelor de detecție pe bază de presiune, a tehnologiilor optice, radar, LiDAR și video a demonstrat diversitatea soluțiilor disponibile pentru monitorizarea traficului. Fiecare dintre aceste tehnologii prezintă avantaje și limitări specifice, iar alegerea optimă depinde de contextul aplicării, de obiectivele urmărite și de resursele disponibile. Integrarea acestor echipamente în sisteme coerente de management al traficului reprezintă una dintre direcțiile majore de dezvoltare a infrastructurii rutiere moderne.

Un aspect central îl constituie analiza metodelor statistice aplicate în studiul traficului rutier. Indicatorii statistici fundamentali, distribuțiile de probabilitate și criteriile de validare a modelelor oferă instrumentele necesare pentru interpretarea corectă a datelor de trafic și pentru fundamentarea deciziilor de management. Utilizarea statisticii descriptive și inferențiale permite transformarea volumelor mari de date colectate prin sisteme automate în informații relevante privind nivelul de serviciu, siguranța și performanța rețelelor rutiere. În acest sens, statistica nu reprezintă doar un instrument de analiză retrospectivă, ci și un suport esențial pentru prognoză și planificare.

Fundamentele teoretice ale traficului rutier, abordate în capitolele dedicate cinematicii deplasării vehiculelor și relațiilor fundamentale dintre viteză, densitate și flux, au evidențiat caracterul complex al fenomenelor de circulație. Modelele macroscopice clasice, precum cele propuse de Greenshields, Greenberg, Underwood, Drew sau May, oferă cadre conceptuale utile pentru înțelegerea comportamentului traficului în diferite regimuri de funcționare. Deși aceste modele prezintă limitări inerente, ele rămân repere teoretice esențiale, servind drept bază pentru dezvoltarea unor modele avansate și pentru calibrarea sistemelor moderne de simulare a traficului. Analiza diagramelor fundamentale și a relațiilor dintre parametrii de trafic a subliniat necesitatea adaptării modelelor la condițiile locale și la particularitățile infrastructurii analizate.

Un capitol distinct a fost dedicat măsurilor de calmare a traficului rutier, evidențiind rolul acestora în creșterea siguranței și în îmbunătățirea calității mediului urban. Clasificarea măsurilor de calmare, de la intervenții fizice asupra infrastructurii până la soluții bazate pe semnalizare și reglementare, a arătat că managementul traficului nu se limitează la optimizarea fluxurilor, ci include și obiective sociale și de mediu. Implementarea acestor măsuri necesită o abordare integrată, care să țină cont de comportamentul utilizatorilor, de caracteristicile spațiului urban și de impactul asupra tuturor categoriilor de participanți la trafic.

Analiza factorului uman a evidențiat rolul determinant al comportamentului participanților la trafic în dinamica sistemului rutier. Caracteristicile conducătorilor auto, ale pasagerilor, ale bicicliștilor, ale utilizatorilor de trotinete electrice și ale pietonilor influențează în mod direct siguranța și eficiența circulației. Înțelegerea acestor influențe este importantă pentru proiectarea unor soluții de management al traficului care să fie nu doar tehnic eficiente, ci și acceptate social. În acest context, conceptul de utilizatori vulnerabili capătă o importanță deosebită, impunând adaptarea infrastructurii și a reglementărilor pentru a asigura un nivel adecvat de protecție și accesibilitate.

Un element transversal îl constituie integrarea tehnologiilor emergente în managementul traficului rutier. Sisteme inteligente de transport, platforme *Smart City*, soluții bazate pe inteligență artificială și analiză avansată a datelor oferă oportunități semnificative pentru optimizarea circulației și reducerea impactului negativ al traficului. Integrarea senzorilor avansați, a sistemelor de comunicații și a platformelor de analiză permite trecerea de la un management reactiv al traficului la unul proactiv și predictiv. În acest context, interoperabilitatea și securitatea datelor devin aspecte critice care trebuie abordate în mod sistematic.

Se evidențiază, de asemenea, limitele abordărilor actuale în managementul traficului rutier. Complexitatea crescută a sistemelor de transport, diversificarea modurilor de deplasare

și incertitudinile asociate comportamentului uman impun o permanentă adaptare a metodelor și instrumentelor utilizate. Modelele teoretice clasice, deși valoroase, nu pot surprinde în totalitate dinamica reală a traficului modern, caracterizat de interacțiuni multiple și de influențe externe variabile. În acest sens, este necesară dezvoltarea unor modele hibride, care să combine fundamentele teoretice consacrate cu metodele moderne de analiză bazate pe date.

Direcțiile viitoare de cercetare și aplicare practică în domeniul managementului traficului rutier se conturează în jurul conceptelor de mobilitate sustenabilă, siguranță rutieră și digitalizare. Vehiculele conectate și autonome, infrastructura inteligentă și sistemele avansate de asistență pentru conducători auto vor transforma profund modul în care este gestionat traficul. Integrarea acestor tehnologii necesită nu doar soluții tehnice, ci și adaptări legislative, instituționale și culturale. În acest context, rolul inginerului de trafic evoluează de la proiectant de infrastructură către manager al unui sistem complex, interdisciplinar.

În concluzie, managementul traficului rutier reprezintă un domeniu dinamic și multidimensional, aflat la intersecția dintre inginerie, tehnologie, științe sociale și politici publice. Volumul de față a urmărit să ofere o abordare unitară și coerentă a acestui domeniu, evidențiind atât fundamentele teoretice, cât și aplicațiile practice și direcțiile de dezvoltare viitoare. Prin integrarea cunoștințelor clasice cu tehnologiile emergente și prin accentul pus pe factorul uman, se creează premisele unui management al traficului orientat către siguranță, eficiență și sustenabilitate, capabil să răspundă provocărilor mobilității contemporane.

Bibliografie

1. Analiză a conceptului *shared space* în context românesc (UrbanizeHub, *De ce nu ar funcționa shared spaces în România*), https://urbanizehub.ro/de-ce-nu-functioneaza-shared-space-romania/?utm_, accesat la data de 12.12.2025.
2. ASRO. 1989. *STAS 10144/5-89 – Capacitatea de circulație a drumurilor. Metode de calcul*. București: ASRO.
3. Bonabeau, Eric. 2002. „Agent-Based Modeling: Methods and Techniques for Simulating Human Systems.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (supl. 3): 7280–7287.
4. CESTRIN. 2015. *Buletin Tehnic BT 02/2015*. București: CESTRIN.
5. CESTRIN. 2016. *Buletin Tehnic BT 01/2016*. București: CESTRIN.
6. CESTRIN. 2017. *Buletin Tehnic nr. 312/2017 – Metodologia efectuării anchetelor de circulație rutieră*. București: CESTRIN.
7. CNAIR. (2015). *Instrucțiuni tehnice privind staționarea pentru anchete de circulație* (Buletin Tehnic nr. 289/2015).
8. Comisia Europeană. 2001. *Directiva 2001/116/CE din 20 decembrie 2001 de adaptare la progresul tehnic a Directivei 70/156/CEE privind omologarea de tip a autovehiculelor și a remorcilor acestora* (Text cu relevanță pentru SEE).
9. Compania Națională de Administrare a Infrastructurii Rutiere. 2010. *Normativ privind semnalizarea rutieră (AND 527)*. București: CNAIR.
10. DataCollect Traffic Systems GmbH. 2025. „SDR Radar Traffic Classifier.” Accesat la data de 21.10.2025. <https://www.datacollect.com/en/mobility-data-analysis/measuring-systems/sdr-radar-traffic-classifier/>
11. DataFromSky, „DataFromSky: Deep Traffic Video Analysis and Vehicle Detection Platform” Accesat la data de 23.10.2025, <https://datafromsky.com/>
12. Drew, Donald R. 1968. *Traffic Flow Theory and Control*. New York: McGraw-Hill.
13. Esri. 2025. „ArcGIS Drone2Map: 2D & 3D Photogrammetry and Reality Capture Software.” Accesat la data de 24.10.2025. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-reality/products/arcgis-drone2map/>
14. European Commission. 2013. „Urban Mobility Package.” <https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/urban-transport>, accesat la data de 15.12.2025.
15. European Committee for Standardization. 2021. *Accessibility and Usability of the Built Environment – Functional Requirements (EN 17210:2021)*. Brussels: CEN.

16. European Cyclists' Federation. 2023. „Road Safety: Safe Lateral Passing Distances.” <https://www.ecf.com/en/news/road-safety-safe-lateral-passing-distances>, accesat la data de 15.12.2025.
17. FLIR. 2025. „TrafiCam x-stream: Vehicle Presence and Data Collection Sensor.” Accesat la data de 23.10.2025. <https://www.flir.com/products/flir-trafficam-x-stream/>
18. Greenberg, H. 1959. „An Analysis of Traffic Flow.” *Operations Research* 7 (1): 79–85.
19. Guvernul României. 1997. *Ordonanța nr. 43/1997 privind regimul drumurilor*. Republicată, cu modificările și completările ulterioare. București. <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/11269>, accesat la data de 10.07.2025.
20. Guvernul României. 2002. *Ordonanța de urgență nr. 195/2002 privind circulația pe drumurile publice*. Republicată în Monitorul Oficial al României, cu modificările și completările ulterioare.
21. Guvernul României. 2006. *Hotărârea nr. 1391/2006 pentru aprobarea Regulamentului de aplicare a OUG nr. 195/2002 privind circulația pe drumurile publice*. Republicată în Monitorul Oficial al României, cu modificările și completările ulterioare.
22. Helbing, Dirk, și Péter Molnár. 1995. „Social Force Model for Pedestrian Dynamics.” *Physical Review E* 51 (5): 4282–4286.
23. Institutul Național de Statistică. 2023. *Lungimea căilor de transport la sfârșitul anului 2022*. București: Institutul Național de Statistică. ISSN 1584-8132.
24. Kustom Signals. 2025. „Falcon HR Handheld Radar.” Accesat la data de 21.10.2025. <https://kustomsignals.com/handheld-radar/falcon-hr>
25. Laser Technology Inc. 2025. „LTI 20/20 TruCAM® II: Handheld Photo/Video LIDAR Speed Enforcement Device.” Accesat la data de 24.10.2025. <https://lasertech.com/product/trucam-ii-speed-enforcement-laser/>
26. May, Adolf D. 1965. *Traffic Flow Fundamentals*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
27. Ministerul Transporturilor. 2002. *Normativ pentru determinarea traficului de calcul pentru proiectarea drumurilor din punct de vedere al capacității portante și al capacității de circulație (AND 584-2002)*. București: Ministerul Transporturilor.
28. Pix4D. 2025. „Pix4D: Professional Photogrammetry and Drone Mapping Software.” Accesat la data de 24.10.2025. <https://www.pix4d.com/>
29. Underwood, R. T. 1961. *Speed, Volume, and Density Relationships: Quality and Theory of Traffic Flow*. New Haven: Yale Bureau of Highway Traffic.
30. Vanderbilt, Tom. 2008. *Traffic: Why We Drive the Way We Do (and What It Says About Us)*. New York: Alfred A. Knopf.

31. VITRONIC. 2025. „POLISCAN Speed: Seamless Speed Enforcement System.” Accesat la data de 21.10.2025. <https://www.vitronic.com/en-us/traffic-technology/speed-enforcement>
32. Wikipedia. 2026. „Shared Space in Bohmte.” Accesat la data de 05.01.2026. https://de.wikipedia.org/wiki/Shared_Space_in_Bohmte.
33. Wikipedia. 2026. „Shared space.” Accesat la data de 05.01.2026. https://en.wikipedia.org/wiki/Shared_space
34. Wikipedia. 2026. „Shared space.” Accesat la data de 05.01.2026. https://en.wikipedia.org/wiki/Shared_space.