

UNIVERSITATEA DIN PITEȘTI
FACULTATEA DE MECANICĂ ȘI TEHNOLOGIE
ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Liviu PETRESCU

TEZA DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Coordonator științific
Prof. univ. dr. ing. Dumitru CRISTEA

PITEȘTI
2018



UNIVERSITATEA DIN PITEȘTI
FACULTATEA DE MECANICĂ ȘI TEHNOLOGIE
Școala Doctorală INGINERIA AUTOVEHICULELOR

Ing. Liviu PETRESCU

TEZA DE DOCTORAT

***STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND RECONSTRUCȚIA
PARAMETRILOR CINEMATICI ȘI DINAMICI
CARACTERISTICI ACCIDENTELOR RUTIERE DE TIPUL
AUTOVEHICUL - PIETON***

❖ **REZUMAT** ❖

Coordonator științific

Prof. univ. dr. ing. Dumitru CRISTEA

Mentori

Prof. univ. dr. ing. Florian IVAN

Prof. univ. dr. ing. Ion IORGA SIMĂN

Prof. univ. dr. habil. ing. Ștefan TABACU

**PITEȘTI
2018**

CUPRINS

	Teza	Rezumat
Introducere	17	7
1. Stadiul actual al cercetărilor privind reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton și obiectivele tezei de doctorat	21	10
1.1. Statistica accidentelor rutiere	21	10
1.2. Obiectivele tezei de doctorat	25	12
1.3. Accidentul rutier de tip autovehicul - pieton.....	26	13
1.3.1. Definirea accidentului rutier	26	13
1.3.2. Clasificarea accidentelor rutiere	26	–
1.3.3. Impactul autovehicul - pieton. Generalități.....	27	13
1.3.4. Mecanismul de impact autovehicul - pieton	28	14
1.3.5. Impactul frontal autovehicul - pieton cu preluare pe capotă și proiectare postimpact	30	–
1.3.6. Impactul frontal autovehicul - pieton cu proiectare postimpact	37	–
1.3.7. Impactul frontal autovehicul - pieton cu proiectare în spate peste plafon	40	–
1.3.8. Impactul frontal autovehicul - pieton cu proiectare spre înainte și rostogolire în aer	42	–
1.3.9. Impactul lateral autovehicul - pieton	44	–
1.4. Evaluarea vitezei de deplasare a autovehiculului în funcție de mecanismul de impact autovehicul - pieton	45	–
1.5. Evaluarea vitezei de deplasare a autovehiculului pe baza distanței de proiectare a pietonului	47	16
2. Reconstrucția computerizată a accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni	53	18
2.1. Aspecte generale	53	–
2.2. Principiul evolutiv și scopul modelării computerizate.....	53	–
2.3. Modelarea computerizată a corpului uman	54	–
2.4. Modelul MULTICORP utilizat în programul PC Crash	55	–
2.5. Programul Virtual Crash - program de simulare pentru reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier, inclusiv impactul de tip autovehicul - pieton	58	–
2.6. Metode analitice utilizate în cadrul reconstrucției parametrilor caracteristici impactului de tip autovehicul-pieton	59	18

2.7. Simularea accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton prin metodele de reconstrucție computerizată a coliziunii cu ajutorul programelor PC Crash și Virtual Crash și validarea parametrilor coliziunii prin metode analitice.....	61	20
2.7.1. Considerații generale	61	20
2.7.2. Studiul impactului autovehicul - pieton prin utilizarea metodelor de reconstrucție computerizată a coliziunii comparativ cu metodele analitice	61	21
3. Studiul dinamicii impactului dintre pieton și autovehicul	73	28
3.1. Prezentare generală	73	28
3.2. Studiul dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză medie de deplasare	74	29
3.2.1. Date cu privire la condițiile în care s-a produs accidentul	74	29
3.2.2. Desfășurarea accidentului rutier	75	29
3.2.3. Consecințele accidentului rutier	76	31
3.2.4. Reconstituirea parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier	79	32
3.2.4.1. Considerații generale	79	32
3.2.4.2. Cinematica și dinamica autoturismului	81	34
3.2.4.3. Cinematica, dinamica și biomecanica pietonului	86	37
3.2.4.4. Reconstituirea parametrilor caracteristici accidentului rutier de tip autovehicul - pieton prin metode analitice	89	39
3.3. Studiul dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză mare de deplasare	90	40
3.3.1. Date cu privire la condițiile în care s-a produs accidentul	90	40
3.3.2. Desfășurarea accidentului rutier	91	41
3.3.3. Consecințele accidentului rutier	93	42
3.3.4. Reconstituirea parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier	94	43
3.3.4.1. Considerații generale	94	43
3.3.4.2. Cinematica și dinamica autoturismului	96	44
3.3.4.3. Cinematica, dinamica și biomecanica pietonului	98	45
3.3.4.4. Reconstituirea parametrilor caracteristici accidentului rutier de tip autovehicul - pieton prin metode analitice	103	50

4. Cercetări experimentale ale accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni	107	52
4.1. Metodologia cercetărilor experimentale	107	52
4.1.1. Obiectivele testelor experimentale	107	52
4.1.2. Stabilirea scenariului de testare experimentală	107	52
4.1.3. Pregătirea experimentului	108	53
4.1.3.1. Pregătirea poligonului de încercări	108	53
4.1.3.2. Pregătirea autovehiculului	109	54
4.1.3.3. Pregătirea manechinului	110	54
4.1.3.4. Pregătirea aparaturii necesară pentru achiziționarea datelor	110	–
4.1.4. Desfășurarea testelor de coliziune	112	55
4.1.4.1. Etapele desfășurării testelor de coliziune	112	–
4.1.4.2. Desfășurarea testului nr. 1	113	55
4.1.4.3. Desfășurarea testului nr. 2	115	–
4.2. Achiziția datelor și rezultatele obținute pe cale experimentală	117	57
4.2.1. Achiziția datelor experimentale	117	57
4.2.1.1. Achiziția datelor din testul de coliziune nr. 1	117	57
4.2.1.2. Achiziția datelor din testul de coliziune nr. 2	118	–
4.2.2. Prelucrarea statistică a datelor experimentale	119	58
5. Modele matematice aferente accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton	124	63
5.1. Aspecte generale	124	63
5.2. Analiza de sensibilitate	126	65
5.3. Model matematic determinist	129	68
5.4. Elemente de analiza intervalelor	132	71
5.5. Model matematic de tip interval	134	73
5.6. Concluzii	138	77
6. Concluzii finale, contribuții principale și deschideri oferite de teza de doctorat	139	78
6.1. Concluzii	139	78
6.2. Contribuții principale	141	80
6.3. Direcții viitoare de cercetare	143	82
Bibliografie	144	83

INTRODUCERE

Procesul de urbanizare, dezvoltarea localităților și infrastructurii rutiere, precum și creșterea numărului de autovehicule au condus la intensificarea traficului rutier și odată cu acesta, la creșterea numărului de accidente rutiere, inclusiv cele de tip autovehicul - pieton.

În aceste condiții, cercetarea evenimentelor rutiere de tip autovehicul-pieton reprezintă un domeniu de actualitate, care trebuie să se adapteze permanent evoluției tehnologice corespunzătoare transportului rutier.

Obiectivele cercetării accidentelor rutiere de tip autovehicul-pieton vizează aspecte privind determinarea vitezei de impact a autovehiculului și a pozițiilor autovehiculului și pietonului în momentul impactului, stabilirea dinamicii accidentului și posibilităților de evitare a acestuia.

Pentru cercetarea accidentelor rutiere se utilizează, de regulă, metoda reconstituirii retrospective care are la bază datele primare achiziționate cu ocazia cercetării efectuate la locul producerii accidentului, precum și cu ocazia examinării tehnice a autovehiculelor și analizei rapoartelor medico-legale privind vătămarea persoanelor. Datele primare se referă la geometria locului producerii accidentului, caracteristicile și avariile vehiculelor, identificarea urmelor materiale, leziunile victimelor, pozițiile finale ale victimelor și vehiculelor.

Înregistrările statistice ale accidentelor de tip autovehicul - pieton relevă faptul că aceste conflicte rutiere se manifestă cu preponderență în mediul urban, unde odată cu dezvoltarea orașelor a crescut semnificativ și traficul pietonal. În zonele urbane mai mult de jumătate din accidente se produc din cauza nerespectării regulilor de circulație de către pietoni.

Practica reconstrucției accidentelor rutiere de acest tip a evidențiat faptul că atât masa pietonului, cât mai ales înălțimea acestuia influențează uneori determinant valorile parametrilor cinematici și dinamici caracteristici impactului de tip autovehicul-pieton.

Prezenta lucrare introduce pentru prima dată un factor de corelație între masa pietonului și înălțimea acestuia. Acest factor, pornindu-se de la studii legate de anatomia umană [1; 33; 66; 90], a fost denumit indicele de masă corporală și definit ca fiind raportul dintre masa corporală, exprimată în kilograme și pătratul înălțimii, exprimată în metri.

În Capitolul 1 al lucrării este redată o sinteză asupra stadiului actual al cercetărilor privind reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentelor rutiere de tip autovehicul-pieton, precum și analiza mecanismelor de impact dintre autovehicul și pieton în funcție de zona de contact cu autovehiculul (impact frontal, impact lateral, impact la mersul cu spatele). În raport cu abordările din literatura de specialitate din domeniul reconstrucției accidentelor de tip

autovehicul - pieton sunt prezentate în acest capitol și principalele obiective ale tezei de doctorat.

Capitolul 2 este destinat prezentării modelelor matematice și programelor specializate pentru reconstrucția computerizată a accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni.

De asemenea, în scopul identificării posibilităților de utilizare a parametrilor semnificativi pentru astfel de coliziuni, inclusiv a distanței de proiectare a victimei pentru evaluarea dinamicii producerii acestor accidente rutiere, se prezintă un studiu asupra impactului dintre autovehicul și pieton prin utilizarea metodelor de reconstrucție computerizată a coliziunii comparativ cu metodele analitice. Pentru reconstrucția accidentului rutier și analiza cinematicii traiectoriei postimpact a pietonului se folosesc programele specializate PC-Crash și Virtual Crash.

În Capitolul 3 se prezintă un studiu asupra dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză medie de deplasare, precum și un studiu asupra dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză mare de deplasare.

În acest capitol sunt redate elementele principale pentru cinematica, dinamica și biomecanica pietonului și sunt analizate modalitățile de evaluare a vitezei de impact a autovehiculului, în raport cu distanța de proiectare a pietonului, prin utilizarea metodelor analitice și prin reconstituirea computerizată a coliziunii autovehicul - pieton.

Pentru reconstrucția acestor accidente rutiere reale se utilizează programul specializat PC-Crash, fiind astfel evaluați parametrii aferenți acestor coliziuni filmate în timp real, printre care accelerații, viteze, distanțe, momente, forțe de contact etc. Pentru aceasta au fost folosite date provenind de la accidente rutiere, produse în localitate, care au fost filmate în timp real de către camere de supraveghere video. S-a utilizat noțiunea de viteză medie pentru viteza de impact a autovehiculului cuprinsă în intervalul de valori 30 - 60 km/h și, respectiv, viteză mare pentru viteza de impact cuprinsă în intervalul de valori 60 - 80 km/h, având în vedere datele și determinările experimentale prezentate în literatura de specialitate, precum și situațiile reale ce se întâlnesc în practica expertizelor tehnice din domeniul accidentelor de tip autovehicul-pieton, care evidențiază faptul că valoarea vitezei de impact a autovehiculului, în majoritatea coliziunilor autovehicul-pieton produse în interiorul localităților, se situează în intervalul 30 - 80 km/h.

Capitolul 4 cuprinde descrierea etapelor cercetării experimentale, fiind prezentată și aparatura utilizată. Sunt redate tehnicile de achiziție a datelor experimentale și prelucrarea statistică a acestor date.

În Capitolul 5 se prezintă corelarea rezultatelor cercetării experimentale cu rezultatele modelării matematice. Sunt redate noțiuni de analiza intervalelor, analiza de sensibilitate, model matematic determinist și un model matematic de tip interval.

Capitolul 6 este rezervat concluziilor finale. De asemenea, în acest capitol se prezintă contribuțiile principale aduse în problematica abordată și se redau unele deschideri oferite de lucrare.

*
* *

Doresc pe această cale să mulțumesc în mod deosebit domnului prof. univ. dr. ing. Dumitru CRISTEA, care a coordonat realizarea tezei de doctorat și mentorilor prof. univ. dr. ing. Florian IVAN, prof. univ. dr. habil. ing. Ștefan TABACU, prof. univ. dr. ing. Ion IORGA SIMĂN, care au contribuit activ la realizarea prezentei lucrări. Mulțumesc cadrelor didactice din departamentul de specialitate pentru sugestiile oferite în vederea finalizării tezei de doctorat.

Mulțumesc domnului conf. univ. dr. ing. Alexandru PETRESCU pentru ajutorul permanent acordat pe timpul pregătirii prin doctorantură și pentru posibilitatea oferită de a utiliza programele de specialitate PC-Crash și Virtual Crash cu licență.

Mulțumesc pentru buna colaborare colectivului din cadrul Facultății de Autovehicule Rutiere de la Universitatea Transilvania din Brașov, care a contribuit la realizarea experimentelor.

De asemenea, mulțumesc familiei pentru înțelegerea și încurajarea de care am beneficiat în permanență pe timpul pregătirii prin doctorantură.

Capitolul 1

Stadiul actual al cercetărilor privind reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton și obiectivele tezei de doctorat

1.1. Statistica accidentelor rutiere

Având în vedere dezvoltarea permanentă la nivel mondial a gradului de urbanizare și motorizare, accidentele de tip autovehicul - pieton și, în special, leziunile pietonilor rezultate în urma acestor accidente continuă să reprezinte în întreaga lume o problemă majoră în domeniul sănătății publice.

În fiecare an, la nivel mondial peste 1,2 milioane de oameni decedază și între 20 și 50 de milioane de persoane suferă vătămări corporale în urma accidentelor de autovehicule, iar dintre aceștia, pietonii reprezintă mai mult de o treime, conform evidențelor prezentate de Organizația Mondială a Sănătății [128].

În cadrul accidentelor rutiere mortale proporția accidentelor rutiere din care au rezultat pietoni decedați variază semnificativ între țări, de la mai mult de jumătate pentru țările din Africa la 15% și chiar mai puțin în America de Nord sau Europa, astfel cum se prezintă în figura 1.1.

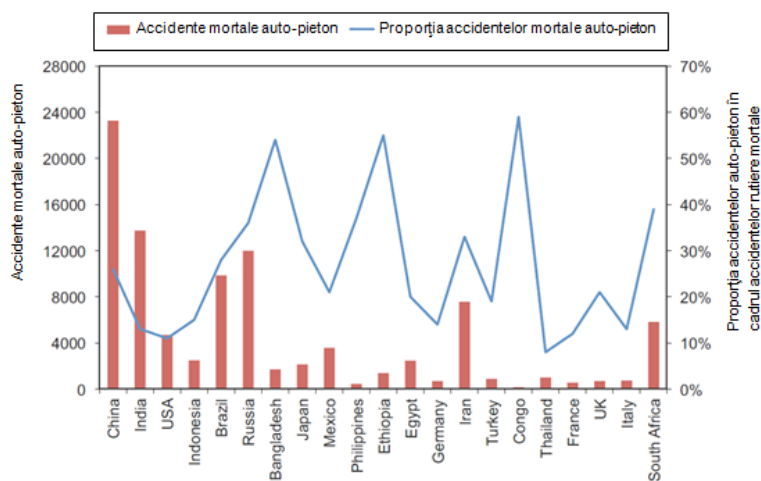


Figura 1.1. Numărul accidentelor mortale de tip autovehicul-pieton în țări cu populația mai mare de 50 de milioane [128]

La nivelul Uniunii Europene, conform [149], în anul 2016 și-au pierdut viața în accidente rutiere 25.671 de persoane, ceea ce indică o diminuare față de anul 2015 cu 2% a numărului de decese, iar conform estimărilor prezentate circa 135.000 de persoane au suferit grave vătămări corporale.

Drumurile din cadrul Uniunii Europene se află în continuare printre cele mai sigure de pe mapamond, fiind înregistrate 50 de decese din accidente rutiere la un milion de locuitori, comparativ cu media globală de 174.

Rezultatele obținute însă nu se situează la un nivel corespunzător față de ținta propusă de autoritățile europene, și anume reducerea la jumătate a numărului de decese cauzate de accidentele rutiere între 2010 și 2020. Între 2001 și 2010 decesele pe drumurile europene s-au redus cu 43%.

Începând cu anul 2010, progresul mediu anual în reducerea numărului de decese generate de accidentele rutiere în Uniunea Europeană a fost de 3,4%, echivalentul unei reduceri de 19% în perioada cuprinsă între 2010 și 2016. În ultimii trei ani, progresele înregistrate în reducerea numărului de decese din accidente rutiere la nivel european a încetinit semnificativ. Reducerea cu 2% în anul 2016 a urmat unei creșteri de 1% în anul 2015, iar în anul 2014 s-a înregistrat o stagnare, astfel încât numărul de decese din accidente rutiere s-a diminuat cu numai 1% începând din anul 2013 (figura 1.2).

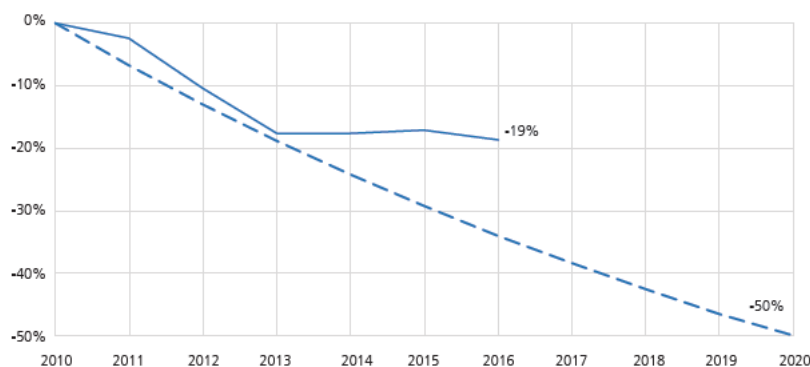


Figura 1.2. Reducerea numărului de decese din accidente rutiere începând cu 2010 (ilustrată cu linie continuă) în raport cu obiectivul Uniunii Europene pentru anul 2020 (ilustrat cu linie punctată) [149]

Din numărul total al victimelor la nivel european în anul 2016, aproximativ 46% au reprezentat conducători auto și pasageri implicați în accidente rutiere, iar pietonii accidentați mortal au reprezentat 21% din totalul deceselor înregistrate pe șosele. În anul 2016, numai 8% din accidentele rutiere mortale s-au produs pe autostrăzi, restul de 55% au avut loc în mediul extraurban și 37% au avut loc în zonele urbane.

În România în anul 2016 s-au înregistrat 30.751 accidente rutiere, în urma cărora 1.913 persoane și-au pierdut viața, iar 39.562 au suferit vătămări corporale. Pe șoselele din România au fost înregistrate, în medie, în fiecare zi a anului 2016, 84 de accidente de circulație și 121 de victime. Numărul accidentelor de circulație generatoare de vătămări corporale a crescut cu 6,2%, prin comparație cu anul 2015, iar numărul persoanelor rănite a fost mai mare cu 7,5%.

Referitor la dinamica accidentelor de circulație grave, statisticile europene privind accidentele rutiere și consecințele acestora indică faptul că România se situează pe ultimele locuri în ceea ce privește siguranța rutieră. La nivel național numărul accidentelor mortale se află în creștere, ceea ce atrage inclusiv amplificarea prejudiciului în plan economic, astfel costurile accidentelor rutiere mortale în România tinzând să devină extrem de ridicate, în conformitate cu Master Planul General de Transport acestea fiind estimate la cel puțin 1,2 miliarde euro (5,4 miliarde lei) pe an.

Principala cauză în ceea ce privește numărul ridicat de accidente rutiere mortale este reprezentată de lipsa de infrastructură, în special lipsa autostrăzilor. Alte cauze sunt reprezentate de starea tehnică a vehiculelor și nerespectarea normelor de circulație rutieră, atât de către unii conducători auto, cât și de către pietoni, în condițiile în care în majoritatea situațiilor s-au înregistrat coliziuni produse cu ocazia traversării nereglementare a pietonilor.

1.2. Obiectivele tezei de doctorat

Având în vedere cele prezentate anterior cu privire la modul actual de abordare a reconstrucției accidentelor de tip autovehicul - pieton și în scopul identificării posibilităților de utilizare a parametrilor semnificativi pentru astfel de coliziuni, inclusiv a distanței de proiectare a victimei, în evaluarea dinamicii accidentelor rutiere cu implicare pietonală se stabilesc următoarele obiective principale ale tezei de doctorat:

1. Prezentarea fundamentelor matematice ale fenomenului de ciocnire și a principalelor modele matematice și programe computerizate utilizate în cadrul reconstrucției accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton.

2. Stabilirea valorilor mărimilor și criteriilor utilizate în literatura de specialitate pentru evaluarea severității accidentului și consecințelor acestuia asupra pietonilor.

3. Posibilitatea utilizării corelației dintre tipul mecanismului de impact și viteza autovehiculului în momentul coliziunii cu pietonul, în situația lipsei unor alte probe materiale necesare reconstituirii accidentului rutier.

4. Identificarea posibilităților de evaluare a vitezei autovehiculului în momentul coliziunii cu pietonul prin corelare cu amplitudinea avariilor înregistrate la autovehicul.

5. Analiza și reconstrucția accidentelor rutiere reale de tip autovehicul - pieton, utilizând biomecanica impactului și stabilirea valorilor parametrilor cinematici și dinamici caracteristici coliziunii cu pietonul.

6. Punerea în evidență a corelației dintre mărimea vitezei de impact a autovehiculului și distanța de proiectare a pietonului.

7. Studiul dinamic al cinematicii pietonului la impactul frontal cu autovehiculul, prin efectuarea unor încercări de coliziune de tip autovehicul - pieton.

8. Evidențierea influenței unor factori asupra parametrilor specifici accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni.

9. Elaborarea unui model matematic pentru stabilirea vitezei de impact a autovehiculului la impactul frontal cu pietonul.

10. Posibilitatea analizării și reconstrucției accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni, prin apelarea la analiza intervalelor.

1.3. Accidentul rutier de tip autovehicul - pieton

1.3.1. Definirea accidentului rutier

Accidentul rutier reprezintă un eveniment care se produce pe drumul public și care constă în coliziunea a cel puțin două vehicule, sau a unui vehicul cu alți participanți la trafic (pieton, biciclist etc), ori cu un alt obstacol, din care rezultă pagube materiale sau vătămarea integrității corporale, ori decesul unor persoane.

Conform Ordonanței de Urgență a Guvernului României nr. 195/2002 actualizată, accidentul de circulație este evenimentul care întrunește cumulativ următoarele condiții:

- a) s-a produs pe un drum deschis circulației publice ori și-a avut originea într-un asemenea loc;
- b) a avut ca urmare decesul, rănirea uneia sau a mai multor persoane ori avarierea a cel puțin unui vehicul sau alte pagube materiale;
- c) în eveniment a fost implicat cel puțin un vehicul în mișcare.

1.3.3. Impactul autovehicul - pieton. Generalități

Conform clasificărilor prezentate în statisticile Uniunii Europene, participanții la trafic sunt grupați în trei categorii:

- I) - conducători de vehicule (în această categorie fiind incluse persoanele care conduc orice vehicul cu motor sau nu, inclusiv cu tracțiune animală);
- II) - pasageri (persoane aflate în vehicule, cu excepția conducătorului vehiculului);
- III) - pietoni.

Deși toți participanții la trafic sunt supuși riscului de a suferi vătămări corporale în accidente de circulație, care pot fi chiar letale, există diferențe majore între categoriile de participanți la trafic, în ceea ce privește riscul de vătămare.

Pietonii, prin comparație cu persoanele care se deplasează în diferite vehicule, sunt printre cei mai expuși participanți la trafic, în special în zonele în care traficul este variat și are intensitate ridicată sau în zonele în care deplasarea este asociată și cu lipsa de separație între diferiții participanți la trafic.

Incidentele rutiere cu implicare pietonală pot fi generate prin moduri foarte variate, pietonii putând să se accidenteze fără implicarea celorlalți participanți la trafic, însă cele mai frecvente coliziuni în care pietonii sunt implicați sunt accidentele cu autovehicule.

Accidentul rutier de tip autovehicul - pieton se poate defini ca fiind orice contact fizic ce apare între un pieton și un autovehicul aflat în mișcare sau în repaus [17].

Având în vedere situația unui impact cu un autovehicul, acest tip de coliziune opune un pieton având o masă în majoritatea cazurilor în intervalul de la 20 kg la 150 kg, împotriva unui autovehicul a cărui masă este în mare parte de peste 1000 kg, acest parametru prezentând variații ample în funcție de diferitele tipuri de autovehicule.

Așadar, pietonii reprezintă o categorie vulnerabilă de participanți la trafic, în condițiile în care aceștia nu sunt protejați de o caroserie, ceea ce implică o diferență amplă de masă în situația unei coliziuni cu un autovehicul. Prin urmare, accidentele rutiere în care sunt implicați pietoni diferă semnificativ față de restul tipurilor de incidente de trafic.

Pentru pietoni cel mai mare risc de a fi implicați într-un accident rutier este în mediul urban. Faptul că în intravilan, cu precădere în mediul urban, față de extravilan, există o populație mai densă, iar distanțele ce trebuie parcurse până la destinație sunt mai scurte, determină ca numărul de pietoni să fie mai ridicat. Traficul din mediul urban, fiind mai complex comparativ cu cel din extravilan, solicită mai intens la nivel mental toți participanții la trafic, ceea ce se reflectă și în numărul mare de accidente cu implicare pietonală.

1.3.4. Mecanismul de impact autovehicul - pieton

Un accident rutier de tip autovehicul - pieton poate fi structurat în trei faze, care sunt ilustrate în figura 1.3:

- faza de contact,
- faza de zbor,
- faza de rostogolire și alunecare a victimei pe sol.

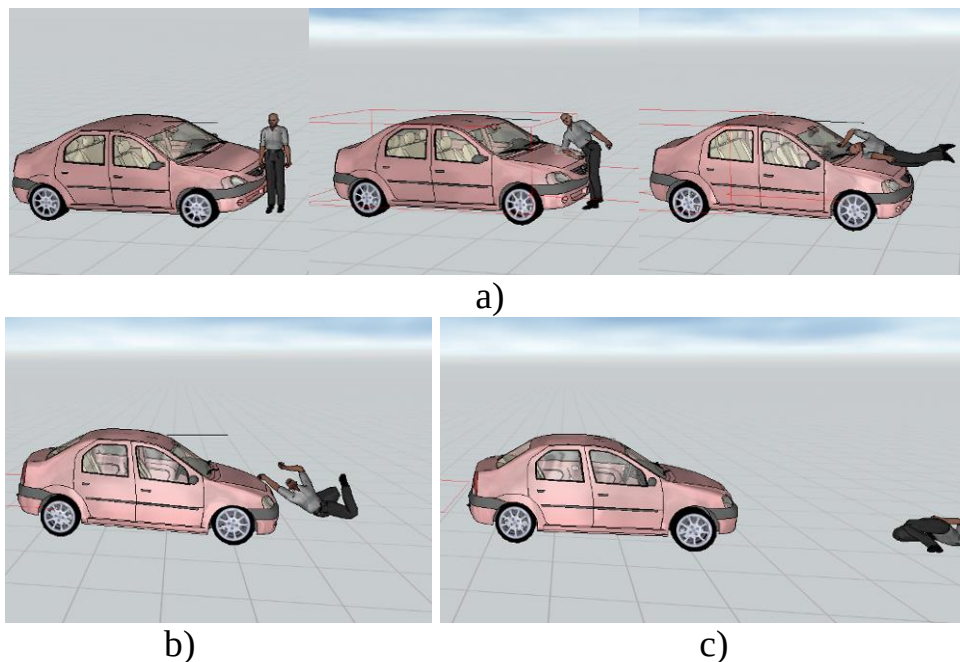


Figura 1.3. Faze dinamice caracteristice accidentului rutier de tip autovehicul - pieton: a) faza de contact; b) faza de zbor; c) faza de rostogolire și alunecare a victimei pe sol

Principalele elemente care pot influența semnificativ mecanismul de impact autovehicul - pieton sunt:

- condițiile inițiale de contact dintre autovehicul și pieton;
- dimensiunile de gabarit și masa corpului uman;
- dimensiunile de gabarit și configurația caroseriei autovehiculului.

În literatura de specialitate [38; 73; 93; 104; 120] sunt prezentate, ca fiind referențiale, cinci tipuri corespunzătoare mecanismului de impact produs între autovehicul și pieton, și anume:

- impactul frontal autovehicul - pieton cu preluare pe capotă și proiectare postimpact;
- impactul frontal autovehicul - pieton cu proiectare postimpact;
- impactul lateral autovehicul - pieton;
- impactul frontal autovehicul - pieton cu proiectare în spate peste plafon;
- impactul frontal autovehicul - pieton cu proiectare spre înainte și rostogolire în aer.

1.5. Evaluarea vitezei de deplasare a autovehiculului pe baza distanței de proiectare a pietonului

Un accident rutier de tip autovehicul - pieton, astfel cum s-a prezentat anterior, poate fi structurat în trei faze: faza de contact, faza de zbor, faza de rostogolire și alunecare a victimei pe suprafața pe care aceasta este proiectată. În urma contactului cu autovehiculul, pietonului i se imprimă viteza autovehiculului, descriind o traiectorie parabolică, în faza de zbor, traiectorie ce diferă în funcție de poziția punctului de impact pe autovehicul în raport cu centrul de greutate al pietonului. Poziția relativă a acestor două puncte determină sau nu existența unei componente de rotație în jurul centrului de greutate al pietonului.

În urma impactului cu autovehiculul, pietonul poate să rămână în repaus pe suprafața de cădere, în fața sau în spatele planului frontal al autovehiculului oprit în poziția finală.

Situația în care pietonul ajunge în repaus pe suprafața de cădere, în fața planului frontal al autovehiculului oprit în poziția finală, este caracteristică impactului la viteze de până la 50 km/h, fie că autoturismul este frânat energic în momentul impactului, fie că acesta este frânat energic imediat după impact. În situația în care pietonul este și preluat pe capotă se pot constata distanțe semnificative între planul frontal al autovehiculului și poziția de repaus a victimei în fața acestuia.

Cazul în care pietonul ajunge în repaus pe suprafața de cădere, în spatele planului frontal al autovehiculului oprit în poziția finală, este specific situațiilor în care viteza de impact are valori foarte ridicate sau în care viteza de impact depășește 55 - 60 km/h, iar autovehiculul nu este frânat sau este frânat mai puțin intens, precum și în situații de coliziune cu extremitățile planului frontal al autovehiculului.

În urma producerii impactului între pieton și partea din față a autovehiculului, corpul pietonului se desprinde ulterior de autovehicul și, după deplasarea aferentă fazei de zbor, cade pe carosabil aproximativ cu aceeași viteză ca în momentul lovirii sale. Între viteza de impact și duratele sau distanțele aferente fazelor de lovire și de zbor nu poate fi stabilită o corespondență univocă, deoarece sunt influențate de o serie de factori care nu pot fi riguros cuantificați, cum sunt: decelerația autovehiculului în perioada impactului, rigiditatea corpului și îmbrăcămintei pietonului în zona colizionată de autovehicul etc.

Nici între distanța de deplasare a corpului pietonului pe carosabil și viteza de impact a autovehiculului nu a putut fi impusă o dependență univocă prin intermediul unui coeficient de rezistență la înaintare, întrucât acesta este influențat de o serie de factori incomensurabili, astfel:

- pentru coeficientul de frecare dintre îmbrăcămintea pietonului și îmbrăcămintea carosabilului nu sunt cunoscute valori suficient de precise;
- distanțele de frecare ce sunt parcurse prin alunecarea sau rostogolirea corpului și care nu se pot evalua;
- nu se poate aprecia cum influențează asupra coeficientului de rezistență la înaintare a corpului, ruperile unor organe interne, oase sau obiecte de îmbrăcăminte.

Printre primele studii cu privire la influența vitezei de deplasare a autovehiculului asupra distanței de proiectare a pietonului au fost studiile realizate de H. Appel (1975). Acesta pornind de la analiza a 137 de cazuri reale a efectuat un studiu empiric și a evidențiat faptul că distanța de proiectare a pietonilor a evoluat proporțional cu pătratul vitezei de impact a autovehiculului.

Studiul realizat a mai relevat faptul că prin comparație cu adulții, în cazul copiilor proiectarea s-a produs pe o distanță mai mare, precum și faptul că pietonii colizionați de autovehicule cu partea din față înaltă au fost proiectați pe o distanță mai mare față de pietonii care au fost colizionați de autovehicule cu înălțimea mai redusă a părții din față. Astfel, în funcție de configurația părții din față a autovehiculului și diferențierea pietonilor pe categorii (adulți și copii) au fost determinate următoarele relații:

$$S_p = 0,070 \cdot v_i^2 - \text{pentru situația în care pietonii sunt adulți;} \quad (1.1)$$

$$S_p = 0,088 \cdot v_i^2 - \text{pentru situația în care pietonii sunt copii;} \quad (1.2)$$

$$S_p = 0,084 \cdot v_i^2 - \text{pentru situația în care autovehiculul are partea din față} \quad (1.3)$$

înaltă și proiectarea pietonului se produce spre înainte;

$$S_p = 0,065 \cdot v_i^2 - \text{pentru situația în care autovehiculul are partea din față} \quad (1.4)$$

cu înălțime redusă, iar pietonul este preluat pe capotă și proiectat;

unde: - S_p reprezintă distanța de proiectare a pietonului în plan orizontal

de la locul impactului până la poziția de repaus, exprimată în [m];

- v_i reprezintă viteza de impact a autovehiculului, exprimată în [m/s].

Ecuatiile lui Appel s-a constatat că oferă rezultate corespunzătoare în cazul mecanismelor de impact cu proiectare în care sunt implicați copii, modelul matematic în situația coliziunii cu preluarea pe capotă și proiectarea pietonilor adulți conducând la valori ale vitezelor de impact mai ridicate față de vitezele rezultate prin alte metode.

Modelul elaborat de Appel pentru impactul cu autovehicule care au partea din față înaltă prezintă nivelul cel mai ridicat în ceea ce privește corespondența cu datele reale. Reprezentarea matematică a coliziunii în situația autovehiculelor ce au partea din față cu înălțime redusă generează, în cadrul intervalului de valori cunoscut, viteze de impact aflate la limita superioară a intervalului.

Capitolul 2

Reconstrucția computerizată a accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni

2.6. Metode analitice utilizate în cadrul reconstrucției parametrilor cinematici și dinamici caracteristici impactului de tip autovehicul - pieton

Pentru stabilirea unor parametri caracteristici accidentelor rutiere care implică pietoni, în literatura de specialitate [38; 92; 99; 100; 106; 107; 111; 116; 126] se prezintă o serie de metode analitice, cu diferite nivele de complexitate.

Studii realizate în materia impactului autovehicul – pieton de către o serie de cercetători (Kuhnel, Rau, Searle, Toor, Brach etc.) au permis stabilirea unor funcții de regresie ce relaționează viteza autovehiculului din momentul impactului cu distanța totală de proiectare a pietonului, care cuprinde atât faza de zbor, cât și faza de alunecare, pentru situațiile în care acesta este lovit de partea frontală a autovehiculului. Studiile au fost efectuate atât în cazuri reale, cât și în urma utilizării unor manechine.

Așadar, pe baza abordărilor teoretice și a testelor sau încercărilor experimentale realizate prin utilizarea unor manechine ce reproduc dimensiunile și consistența corpului uman, au fost propuse diverse modele și relații de calcul. Se face precizarea că în aceste relații de calcul, prezentate în continuare, constantele cuprinse în formulele respective reprezintă numere dimensionale.

1) Kuhnel propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [111]:

$$S_p = 0,0178a_a V + 0,0271 \frac{V^2}{a_a} \quad (2.1)$$

2) Rau propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [92]:

$$S_p = 0,0052V^2 + 0,0783V \quad (2.2)$$

unde: - V reprezintă viteza de impact a autovehiculului, exprimată în [m/s].

3) Toor propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [116]:

$$V = 8,25S_p^{0,61} \quad (2.3)$$

4) **Stcherbatcheff** propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [106]:

$$S_p = \frac{v^2}{2a_a} + 0,03a_a v \quad (2.4)$$

5) **Searle** propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [100]:

$$V = 3,6 \cdot \frac{\sqrt{2\mu g S_p}}{\cos \theta + \mu \sin \theta} \quad (2.5)$$

unde: - μ este coeficientul de frecare dintre pieton și suprafața carosabilă;
- θ este unghiul de proiectare a pietonului.

Deoarece acest unghi de regulă nu are o valoare cunoscută, prin minimizarea și maximizarea unghiului de proiectare din relația (2.5) se pot obține valorile vitezei minimă și maximă:

$$V_{min} = 3,6 \cdot \sqrt{\frac{2\mu g S_p}{1 + \mu^2}} \quad (2.6)$$

$$V_{max} = 3,6 \cdot \sqrt{2\mu g S_p} \quad (2.7)$$

6) **Fugger** propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [38]:

$$V = 8,3604 S_p^{0,6046} \quad (2.8)$$

7) **Schmidt** propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [99]:

$$V = 3,6 \sqrt{\mu^2 h_{cgp} + 2\mu g S_p - \mu h_{cgp}} \quad (2.9)$$

8) **Wood** propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [126]:

$$V = 3,6 \sqrt{\frac{2\mu g (S_p - \mu h_{cgp}) (m_a + m_p)^2}{m_a^2}} \quad (2.10)$$

unde: - m_a [kg] reprezintă masa autovehiculului (include masa automobilului, ocupanților și bagajelor)
- m_p [kg] reprezintă masa pietonului.

9) Rich propune următoarea relație de calcul pentru evaluarea vitezei de impact, V , în funcție de distanța de proiectare a pietonului [107]:

$$V = 3,6 \sqrt{g \left(\frac{d_a^2}{h_{cgp} + d_a} + 2\mu d_g \right)} \quad (2.11)$$

unde: - d_a [m] reprezintă distanța de aruncare (de zbor) a pietonului,
- d_g [m] distanța de alunecare a acestuia pe sol.

2.7. Simularea accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton prin metodele de reconstrucție computerizată a coliziunii cu ajutorul programelor PC-Crash și Virtual Crash și validarea parametrilor coliziunii prin metode analitice

2.7.1. Considerații generale

Activitatea de reconstituire a accidentelor rutiere este realizată, în principal, prin două categorii de metode.

Prima categorie o reprezintă metodele analitice de reconstituire a coliziunii, iar a doua categorie o reprezintă metodele computerizate (metode analitice cu rezolvare numerică). Metodele respective se bazează pe principiile mecanicii newtoniene și pe teoremele fundamentale ale ciocnirilor, astfel cum s-a prezentat anterior și, ambele, sunt frecvent utilizate în activitatea de reconstituire a accidentelor de trafic.

Determinarea vitezei de impact a autovehiculului implicat într-un accident rutier de tip autovehicul - pieton reprezintă una dintre principalele cerințe în analiza și reconstituirea accidentelor de circulație [127].

Pe baza abordărilor teoretice și a testelor sau încercărilor experimentale realizate începând din perioada anilor 1960 și până în prezent au fost propuse diverse modele și relații de calcul pentru determinarea vitezei de impact a autovehiculului corelativ cu distanța de proiectare a pietonului.

Simularea accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton este realizată prin metodele de reconstrucție computerizată a coliziunilor cu ajutorul programelor Virtual Crash și PC-Crash, cele două programe fiind cele mai utilizate pe plan european, în această materie.

2.7.2. Studiul impactului autovehicul - pieton prin utilizarea metodelor de reconstrucție computerizată a coliziunii comparativ cu metodele analitice

Pentru realizarea studiului, simularea coliziunii autovehicul - pieton este realizată prin utilizarea celor două programe menționate mai sus, iar în cadrul acestui studiu se prezintă o analiză comparativă între distanța de proiectare a pietonului rezultată prin reconstrucția computerizată a impactului cu autovehiculul și distanța determinată prin metode analitice, fiind utilizate diverse modele de calcul (Kuhnel, Rau, Toor, Searle), cu diferite nivele de complexitate.

În aplicațiile PC-Crash 10.1 și Virtual Crash 2.2, care utilizează un model multicorp al pietonului, se va determina distanța de proiectare a pietonului, S_p , pentru valori ale vitezei de impact a autovehiculului cuprinse în intervalul 20-60 km/h, considerând două variante dinamice și anume:

- varianta dinamică 1 – reprezintă varianta dinamică în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul ($a_{i,p}$)
- varianta dinamică 2 – reprezintă varianta dinamică în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă după producerea impactului cu pietonul ($a_{d,p}$).

Pentru sistemul multicorp, modelul implicit utilizat în aplicația PC-Crash este bazat pe geometria unui manechin Hybrid III, acest model fiind adoptat și în simularea realizată în programul respectiv.

Autovehiculul utilizat în simulare este un autoturism (A) cu parametrii de masă și gabarit caracteristici autoturismelor de tip „Sedan” (ex: Dacia Logan, Renault Symbol, Fiat Albea, Ford Focus, Hyundai Accent, Skoda Octavia etc.) și respectiv, un autoturism (B) cu parametrii de masă și gabarit caracteristici autovehiculelor de tip „S.U.V” (ex: Audi Q7, VW Touareg, BMW X5, Mercedes ML, Hyundai Santa FE, Volvo XC90 etc.).

Autovehiculul de tip A este corespunzător situației în care centrul de greutate al pietonului se află deasupra nivelului capotei față a autoturismului și autovehiculul de tip B este cu profil frontal înalt, corespunzător situației în care centrul de greutate al pietonului se află sub nivelul extremității superioare a părții frontale a autovehiculului.

Dinamica impactului pietonului cu autovehiculul de tip A și cu autovehiculul de tip B, conform simulării computerizate efectuată prin utilizarea programului PC-Crash și Virtual Crash, pentru $V=20\text{km/h}$, în varianta dinamică 1 în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul este prezentată în figura 2.1.

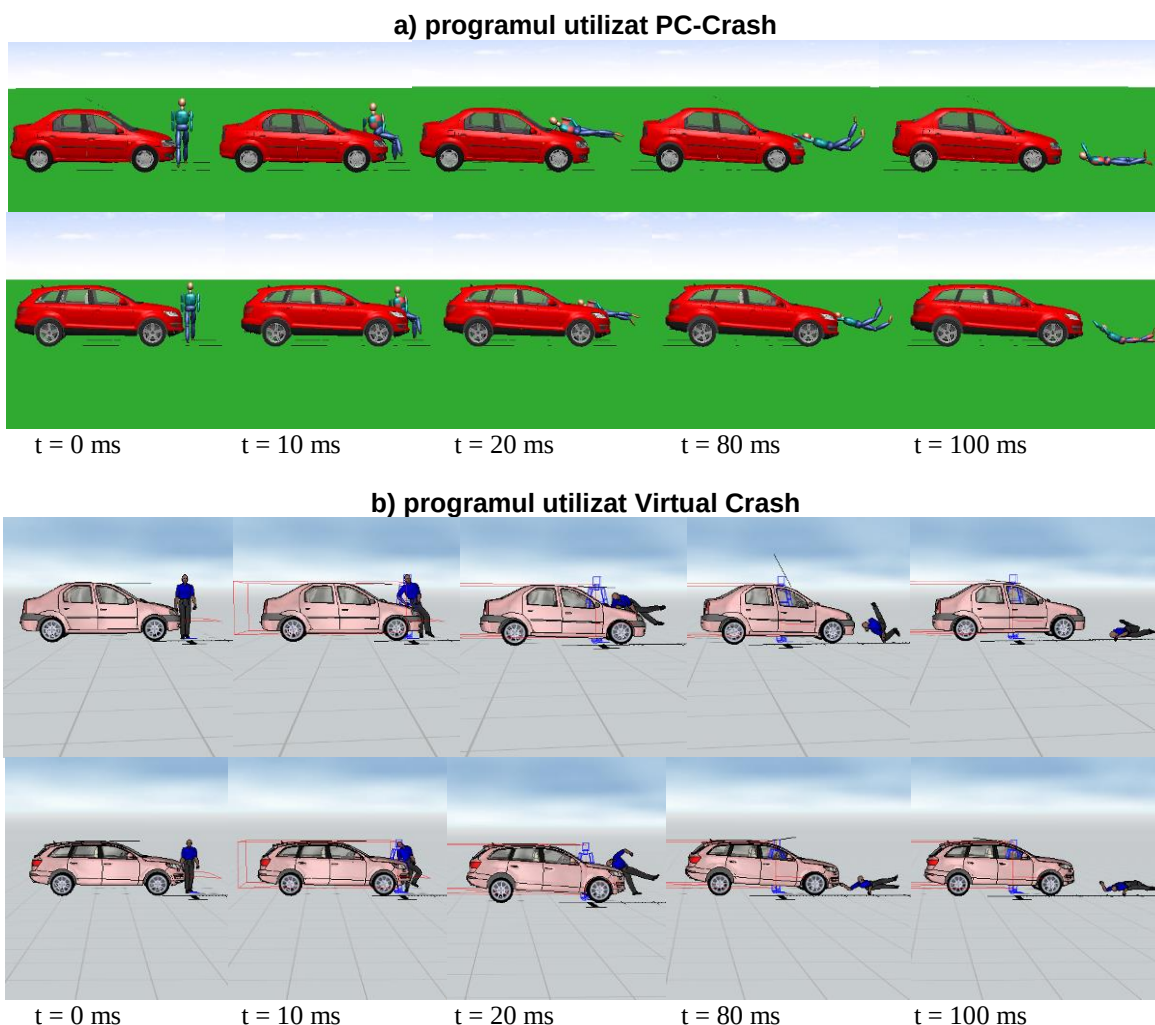


Figura 2.1. Dinamica impactului pietonului cu autovehiculul de tip A și cu autovehiculul de tip B, conform simulării computerizate efectuate pentru $V=20\text{km/h}$, în varianta dinamică 1

Pe timpul impactului cu autovehiculul de tip A sau cu autovehiculul de tip B se poate constata că traiectoria pe care evoluează pietonul este corespunzătoare impactului frontal, în care pietonul este preluat pe capotă și proiectat ulterior spre înainte în raport cu sensul de deplasare al autovehiculului.

În figura 2.2 este prezentată dinamica impactului pietonului cu autovehiculul de tip A și cu autovehiculul de tip B, conform simulării computerizate efectuate prin utilizarea programului PC-Crash și Virtual Crash, pentru $V=40\text{km/h}$, în varianta dinamică 1 în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul.

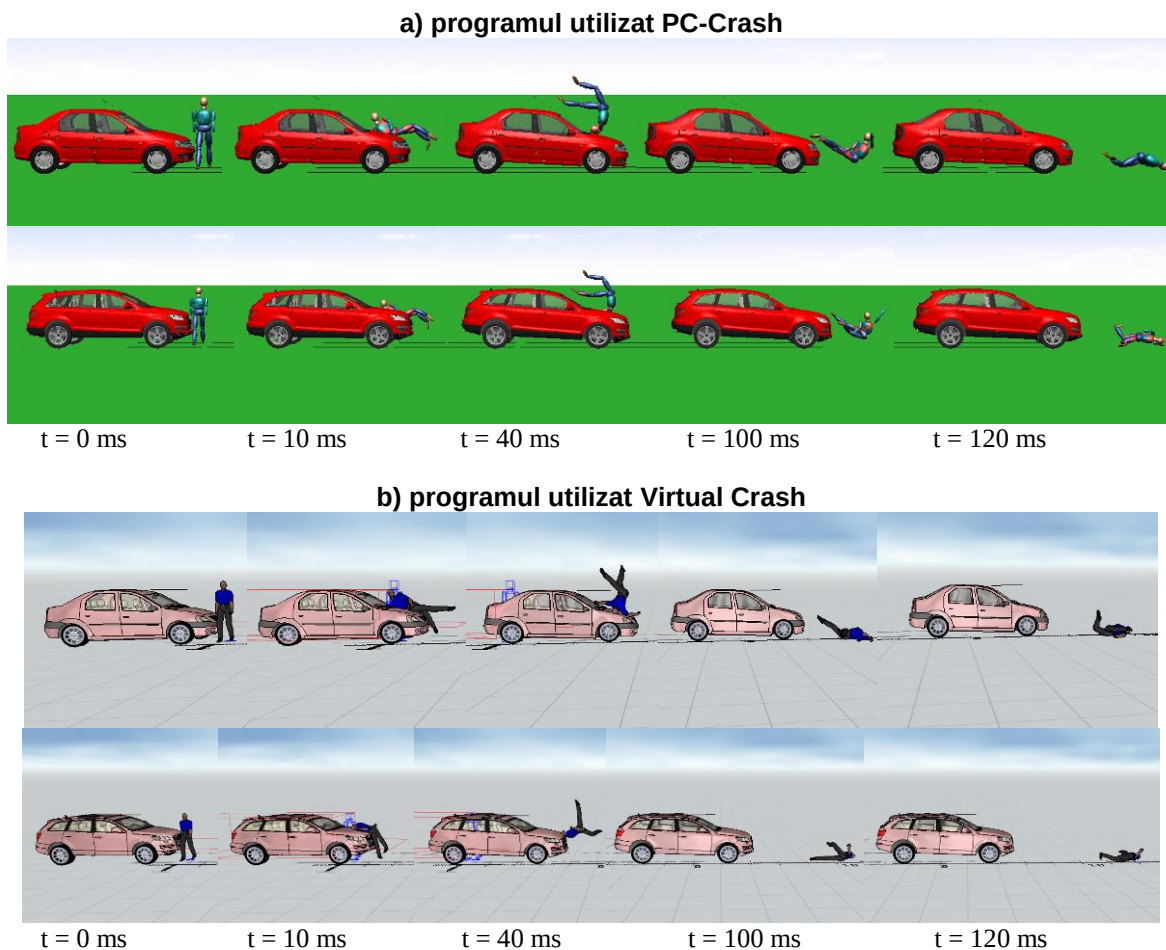


Figura 2.2. Dinamica impactului pietonului cu autovehiculul de tip A și cu autovehiculul de tip B, conform simulării computerizate efectuate pentru $V=40\text{km/h}$, în varianta dinamică 1

Se poate constata că pe timpul impactului cu autovehiculul de tip A sau cu autovehiculul de tip B, traiectoria pe care evoluează pietonul este corespunzătoare impactului frontal, în care pietonul este preluat pe capotă, iar ulterior pietonul este proiectat spre înainte și se rostogolește în aer.

Acest mecanism colizional reprezintă o extensie a mecanismului de impact în care pietonul este preluat pe capotă și ulterior proiectat spre înainte, particularitatea materializată prin rostogolirea pietonului în aer apărând ca urmare a creșterii vitezei de impact și coliziunii cu partea inferioară a corpului pietonului, astfel încât energia transmisă victimei este suficientă pentru a genera rostogolirea în aer a acesteia urmată de contactul cu solul. În acest mod pietonul ajunge în aer în extensie, pe timpul fazei de zbor, în poziție cu capul în jos.

Comparația între rezultatele obținute prin relațiile de calcul determinate pe baza testelor de coliziune (Kuhnel, Rau, Toor), prin metoda analitică (Searle) și

prin simularea computerizată utilizând programele PC-Crash și Virtual Crash este prezentată în figurile 2.3 și 2.4.

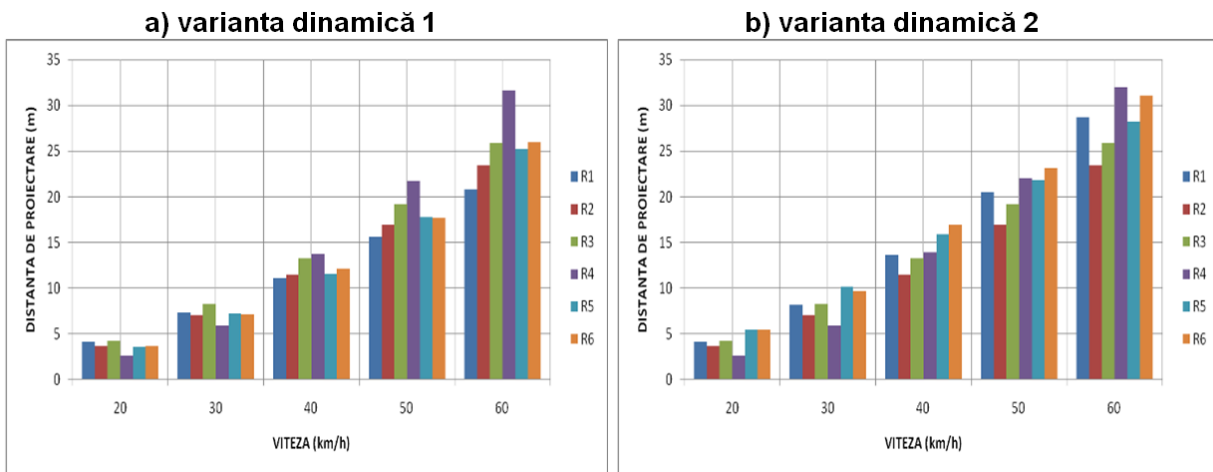


Figura 2.3. Distanța de proiectare. Autovehicul de tip A

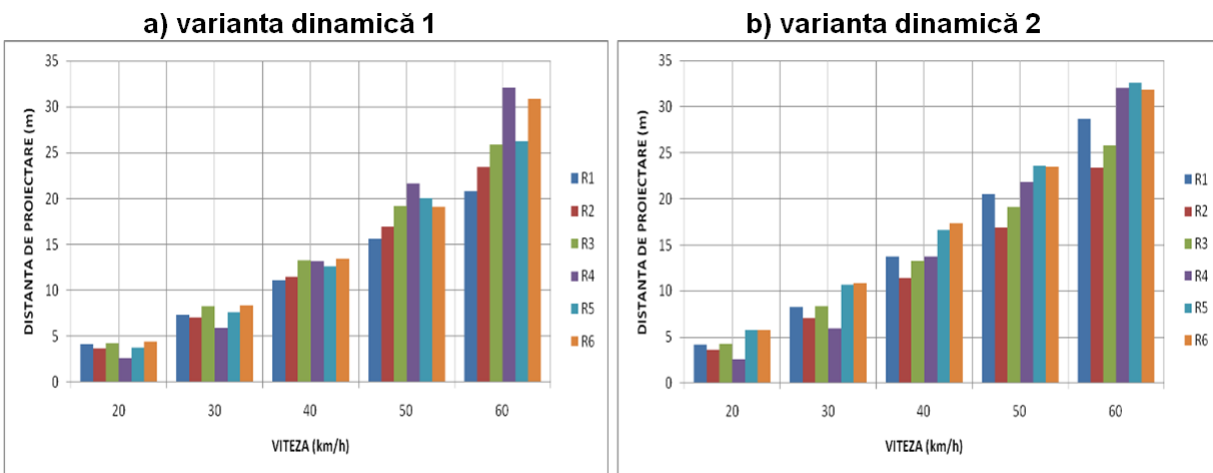


Figura 2.4. Distanța de proiectare. Autovehicul de tip B

Valorile distanței de proiectare în funcție de viteza de impact a autovehiculului relevă faptul că media rezultatelor obținute prin simularea computerizată se află în intervalul de încredere al formulei lui Searle. Valorile determinate prin simulare se situează preponderent către nivelul minim al intervalului de încredere în varianta dinamică 1 în care secvența de decelerare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul, iar în varianta dinamică 2 în care secvența de decelerare a autovehiculului se manifestă după momentul impactului cu pietonul valorile determinate prin simulare se situează în apropierea nivelului maxim al intervalului de încredere.

Valorile determinate analitic se află situate preponderent către nivelul maxim al intervalului respectiv, ceea ce în varianta dinamică 1, în care secvența de decelerare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul, determină un nivel mai ridicat de diferențe, care este însă situat în intervalul de încredere corespunzător relației lui Searle. În varianta dinamică 2, în care secvența de decelerare a autovehiculului se manifestă după momentul impactului cu pietonul, diferențele între valorile determinate analitic și valorile determinate prin simulare au valori semnificative în intervalul de viteze 20 - 40 km/h, astfel încât acestea se află situate în afara intervalului de încredere aferent relației lui Searle.

În figura 2.5 și în figura 2.6 este ilustrată pe diagrama de proiectare a pietonilor corespunzătoare metodei de calcul formulată de Kuhnel&Schulz, distribuția rezultatelor obținute prin utilizarea celorlalte metode analitice, pentru valoarea distanței de proiectare în funcție de viteza de impact a autovehiculului.

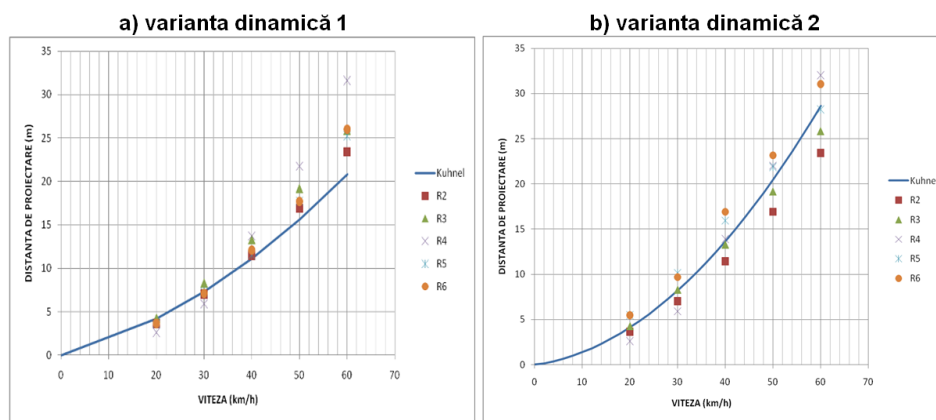


Figura 2.5. Autovehiculul de tip A. Comparația între diagrama de proiectare a pietonilor corespunzătoare metodei de calcul formulată de Kuhnel&Schulz și distribuția rezultatelor obținute prin utilizarea metodelor analitice

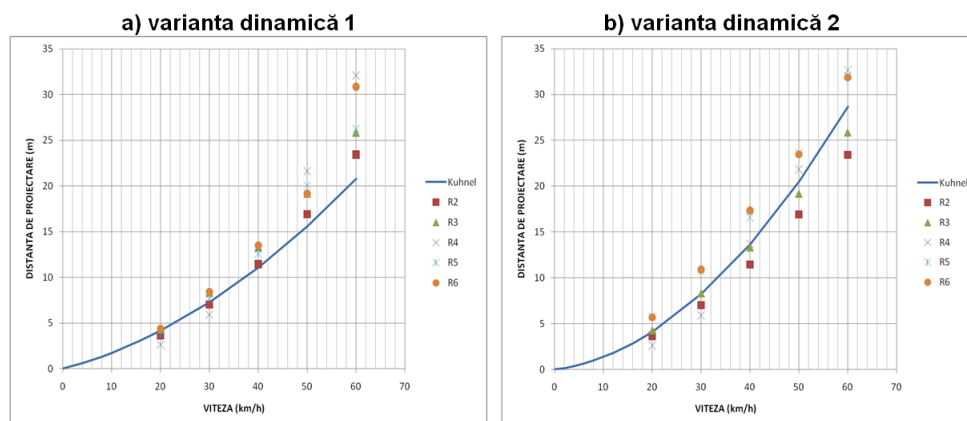


Figura 2.6. Autovehiculul de tip B. Comparația între diagrama de proiectare a pietonilor corespunzătoare metodei de calcul formulată de Kuhnel&Schulz și distribuția rezultatelor obținute prin utilizarea metodelor analitice

În varianta dinamică 1, în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul, diagrama Kuhnel&Schulz este referențială pentru nivelul minim al valorilor distanței de proiectare a pietonului în funcție de viteza de impact a autovehiculului. În această variantă dinamică, pentru viteza autovehiculului superioară valorii de 50 km/h este mai pronunțată dispersia rezultatelor obținute prin utilizarea metodelor analitice în raport cu diagrama Kuhnel&Schulz. Valorile determinate prin metoda de calcul formulată de Searle, pentru viteza autovehiculului superioară valorii de 50 km/h, se află situate la nivelul maxim al intervalului de dispersie.

În varianta dinamică 2, în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă după momentul impactului cu pietonul, dispersia rezultatelor obținute prin utilizarea metodelor analitice în raport cu diagrama Kuhnel&Schulz este semnificativ redusă. Pentru această variantă dinamică există o bună similitudine între metoda de calcul propusă de Kuhnel&Schulz și celelalte metode analitice, care au fost prezentate anterior.

Referitor la rezultatele obținute prin simularea computerizată utilizând programul PC-Crash comparativ cu rezultatele obținute prin simularea computerizată utilizând programul Virtual Crash se poate constata că pentru autovehiculul de tip A având viteza de impact în intervalul 20 - 60 km/h, în varianta dinamică 1 diferențele au valori cuprinse în intervalul 0,23 - 4,55% și în varianta dinamică 2 diferențele au valori cuprinse în intervalul 0,18-8,99%.

În ambele variante dinamice diferența medie de 2,27%, respectiv 5,05%, fiind extrem de redusă. Pentru autovehiculul de tip B, în aceleași condiții dinamice, diferențele au valori cuprinse în intervalul 4,81 - 14,94% în varianta dinamică 1 și în intervalul 0,64 - 4,32% în varianta dinamică 2, diferența medie având de asemenea o valoare redusă, de 10,07% și respectiv 2,06%.

Rezultatele obținute prin simularea computerizată relevă faptul că dublarea masei autovehiculului generează o creștere procentuală a distanței de proiectare cu o valoare cuprinsă în intervalul 5 - 15%, zona superioară a intervalului respectiv fiind corespunzătoare vitezelor de impact mai mari de 50km/h. La viteze reduse de impact, sub 30 km/h, în cadrul proiectării postimpact a pietonului faza de zbor este aproape inexistentă.

Așadar pentru vitezele de impact de la 20 km/h până la 60 km/h, compararea rezultatelor obținute prin simularea computerizată utilizând programul PC-Crash și formulele de calcul (Kuhnel, Rau, Toor și Searle) relevă faptul că relațiile Searle și Kuhnel au generat valori mai ridicate pentru diferența medie, iar diferența medie corespunzătoare relațiilor Rau și Toor a avut valori reduse în varianta dinamică 1, în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă din momentul impactului cu pietonul.

În varianta dinamică 2, în care secvența de frânare a autovehiculului se manifestă după momentul impactului cu pietonul, relațiile Kuhnel și Toor au generat valori mai reduse.

Referitor la formula lui Searle, modul de distribuție a rezultatelor în intervalul de încredere, în special pentru viteze de impact mai mari de 50 km/h, generează un nivel mai ridicat de diferențe și nu permite determinarea cu suficientă precizie a vitezei de impact, ci se poate stabili un interval de valori aferent vitezei de impact. Pentru o mai mare acuratețe, astfel încât să poată fi stabilită o valoare a vitezei de impact din intervalul respectiv, se impune utilizarea acestei formule împreună cu alte modele de calcul, dintre care o parte au fost prezentate anterior.

Concluzionând în ceea ce privește rezultatele obținute prin simularea computerizată utilizând programul PC-Crash comparativ cu rezultatele obținute prin simularea computerizată utilizând programul Virtual Crash se poate constata că diferența medie prezintă valori reduse. Validarea reconstrucției computerizate a unui accident real, prin utilizarea aplicațiilor specializate (PC-Crash, Virtual Crash etc.) se realizează, în principal, pe baza punctului de impact al pietonului cu autovehiculul, traiectoriei pietonului pe timpul impactului și a distanței totale de proiectare a pietonului, respectiv poziției finale de repaus a acestuia. Urmare a contactului cu autovehiculul, pietonului i se imprimă o viteză a cărei valoare este apropiată de viteza autovehiculului, descriind o traiectorie parabolică, în faza de zbor, traiectorie ce diferă în funcție de poziția punctului de impact pe autovehicul în raport cu centrul de greutate al pietonului.

Viteza de impact, masa autovehiculului și configurația autovehiculului, cu precădere la nivelul părții din față, se dovedesc a fi factori extrem de importanți, ce influențează semnificativ configurația traiectoriei și distanța de proiectare a pietonului, precum și amploarea leziunilor produse acestuia.

Așadar comparativ cu metodele analitice de reconstituire a coliziunii, metodele computerizate, care iau în considerație un număr semnificativ mai mare de parametri de intrare, inclusiv pentru structura multicorp aferentă pietonului, reprezintă un mijloc corespunzător de analiză a accidentelor în care sunt implicați pietonii.

Capitolul 3

Studiul dinamicii impactului dintre pieton și autovehicul

3.1. Prezentare generală

Pornind de la analiza înregistrărilor realizate cu camere video ale unor accidente rutiere se prezintă un studiu asupra dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză medie de deplasare și un studiu asupra dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză mare de deplasare. Pentru aceasta au fost folosite date provenind de la două accidente rutiere, produse în localitate, care au fost filmate în timp real de către camere de supraveghere video.

În cadrul primului accident, produs între pieton și un autovehicul cu viteză medie de deplasare, mecanismul de coliziune este corespunzător impactului frontal autovehicul - pieton cu preluare pe capota și parbrizul autoturismului și, ulterior, proiectare postimpact. În ceea ce privește al doilea accident, produs între pieton și un autovehicul cu viteză mare de deplasare, mecanismul de coliziune este corespunzător impactului frontal autovehicul - pieton cu proiectare spre înainte și rostogolire în aer.

S-a utilizat noțiunea de viteză medie pentru viteza de impact a autovehiculului cuprinsă în intervalul de valori 30 - 60 km/h și, respectiv, viteză mare pentru viteza de impact cuprinsă în intervalul de valori 60 - 80 km/h, având în vedere determinările experimentale prezentate în literatura de specialitate și situațiile reale ce se întâlnesc în practica expertizelor tehnice din domeniul accidentelor de tip autovehicul-pieton, care evidențiază faptul că valoarea vitezei de impact a autovehiculului, în majoritatea coliziunilor autovehicul-pieton produse în interiorul localităților, se situează în intervalul 30 - 80 km/h.

Pentru reconstrucția accidentelor rutiere filmate în timp real se utilizează programul specializat PC-Crash 10.1, fiind astfel evaluați parametrii aferenți acestor coliziuni, printre care accelerații, viteze, distanțe, momente, forțe de contact etc.

Obiectivul acestui studiu este de a explicita elementele principale pentru cinematica, dinamica și biomecanica pietonului, precum și analizarea modalităților de evaluare a vitezei de impact a autovehiculului, în raport cu distanța de proiectare a pietonului, prin utilizarea metodelor analitice și prin reconstituirea computerizată a coliziunii autovehicul - pieton.

3.2. Studiul dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză medie de deplasare

3.2.1. Date cu privire la condițiile în care s-a produs accidentul

Accidentul de circulație analizat s-a produs în municipiul București în jurul orei 20¹⁵, pe șoseaua Mihai Bravu în zona intersecției cu Calea Vitan, astfel cum este ilustrat în figura 3.1.



Figura 3.1. Vedere de ansamblu asupra locului în care s-a produs accidentul rutier

În accident a fost implicat un pieton de sex masculin în vârstă de 50 ani, având înălțimea de 1,72 m și masa de 78 kg, precum și un autoturism marca VW Golf, în care se aflau conducătorul auto și doi pasageri. La ora producerii accidentului partea carosabilă, constituită din asfalt, era umedă și acoperită cu mazăgă.

Accidentul rutier a fost filmat în timp real de către o cameră de supraveghere video amplasată în zonă, care înregistrează cu frecvența de 150 cadre/s (fps).

3.2.2. Desfășurarea accidentului rutier

Accidentul fiind filmat în timp real de către camera de supraveghere video, a fost posibilă reconstituirea desfășurării acestuia. Camera de supraveghere video este situată în intersecție, în zona trotuarului de unde pietonul s-a angajat în traversarea străzii.

În figurile 3.2 și 3.3 sunt prezentate două secvențe din înregistrarea video. În figura 3.2 se prezintă secvența ce ilustrează momentul inițial al accidentului, în care bara de protecție față a autovehiculului lovește pietonul, la nivelul membrelor inferioare și în figura 3.3 se prezintă secvența ce ilustrează momentul final al accidentului, când autovehiculul și pietonul s-au oprit din mișcare, ajungând în pozițiile finale pe carosabil.



Figura 3.2. Secvența din înregistrarea video a accidentului ce ilustrează momentul inițial al impactului, în care bara de protecție față a autovehiculului lovește pietonul, la nivelul membrelor inferioare



Figura 3.3. Secvența din înregistrarea video ce ilustrează momentul final al accidentului, când autovehiculul și pietonul s-au oprit din mișcare, ajungând în pozițiile finale pe carosabil

Cele două secvențe din înregistrarea video, prezentate anterior, au permis stabilirea duratei accidentului rutier, și anume 3,5 s de la momentul inițial al impactului autovehicul - pieton și până în momentul opririi acestora din mișcare. Înregistrarea video a accidentului a permis și cunoașterea atât a traiectoriei postimpact a pietonului, cât și a poziției relative dintre pieton și autovehicul la momentul inițial al impactului. Înregistrarea în timp real a accidentului rutier a permis și stabilirea cu precizie a locului impactului dintre automobil și pieton, astfel cum se prezintă în figura 3.2.

Așadar, înregistrarea în timp real a accidentului rutier a oferit posibilitatea stabilirii modului de producere a acestuia cu determinarea momentului și locului impactului, momentului și pozițiilor finale ale autoturismului și pietonului, permițând și cunoașterea traiectoriei postimpact a pietonului și a poziției relative dintre pieton și autovehicul la momentul inițial al impactului.

3.2.3. Consecințele accidentului rutier

Accidentul rutier analizat a avut ca urmări vătămarea corporală a pietonului și avarierea autoturismului VW Golf.

Avariile produse la autoturismul VW sunt ilustrate în figura 3.4, unde s-a notat: A - urme de deformare plastică la nivelul plăcuței de înmatriculare; B - grila radiator ruptă și desprinsă din suport; C - urme de deformare plastică la nivelul capotei motor; D – avarii prezente la nivelul parbrizului.



Figura 3.4. Avariile produse la autoturismul VW în urma impactului cu pietonul

Configurația avariilor la nivelul parbrizului, ilustrate în figura 3.4 și figura 3.5, relevă existența a două focare de avariere, din care unul este mai pronunțat, ceea ce se coroborează cu înregistrarea video a accidentului și indică faptul că au existat nu unul, ci două impacturi ale pietonului cu acest reper, astfel cum va fi prezentat în cadrul reconstrucției accidentului.

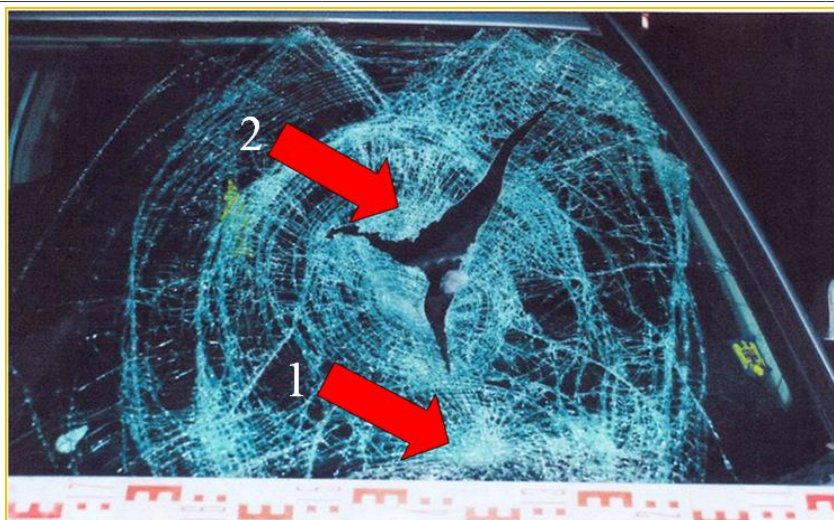


Figura 3.5. Vedere de detaliu asupra avariilor produse la parbrizul autoturismului

Consecințele accidentului asupra pietonului sunt reliefate prin constatările de ordin medico-legal, astfel:

- traumatism grav al capului, cu stare de comă profundă (G.C.S.=3-4 puncte) prin multiple fracturi de neuro și viscerocraniu pe partea dreaptă (în regiunea frontală-volet osos cu interesarea sinusului frontal și a orbitei, la nivelul sinusului maxilar, cu hemosinus, la nivelul sinusului sfenoidal, cu hemosinus, în regiunea temporală și la nivelul procesului alveolar al osului maxilar) și hemoragie cerebrală (contuzie-dilacerare cerebrală frontal dreapta și hemoragie intracraniană la nivelul cortului cerebelos și interemisferic);
- fractură de col femural stâng;
- fractura ambelor oase gamba stângă (diafiză, 1/3 medie);
- traumatism toracic cu contuzie pulmonară stânga.

3.2.4. Reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier

3.2.4.1. Considerații generale

Determinarea momentului și locului impactului, momentului și pozițiilor finale ale autoturismului și pietonului, precum și cunoașterea traiectoriei postimpact a pietonului și a poziției relative dintre pieton și autovehicul la momentul inițial al impactului, care au fost fixate în secvențele înregistrate în timp real de camera de supraveghere video, astfel cum s-a prezentat anterior, au permis reconstituirea parametrilor coliziunii prin utilizarea metodei de reconstrucție computerizată a accidentului.

Pentru reconstituirea parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier analizat s-a utilizat metoda de reconstrucție computerizată a coliziunii cu ajutorul programului PC-Crash.

Programul PC-Crash conține o amplă bază de date, inclusiv caracteristicile tehnice ale autoturismului VW Golf necesare reconstrucției accidentului.

Ansamblul parametrilor dimensionali ai tronsonului de drum unde s-a produs accidentul și pozițiile în care s-au oprit postimpact pe carosabil automobilul și pietonul au fost cunoscute pe baza măsurătorilor efectuate de poliție la locul producerii accidentului.

Schița locului producerii accidentului este prezentată în figura 3.6. Aceasta conține măsurătorile efectuate de poliție la locul producerii accidentului, precum și poziția de impact și pozițiile finale în care s-au oprit, pe carosabil, autoturismul și pietonul.

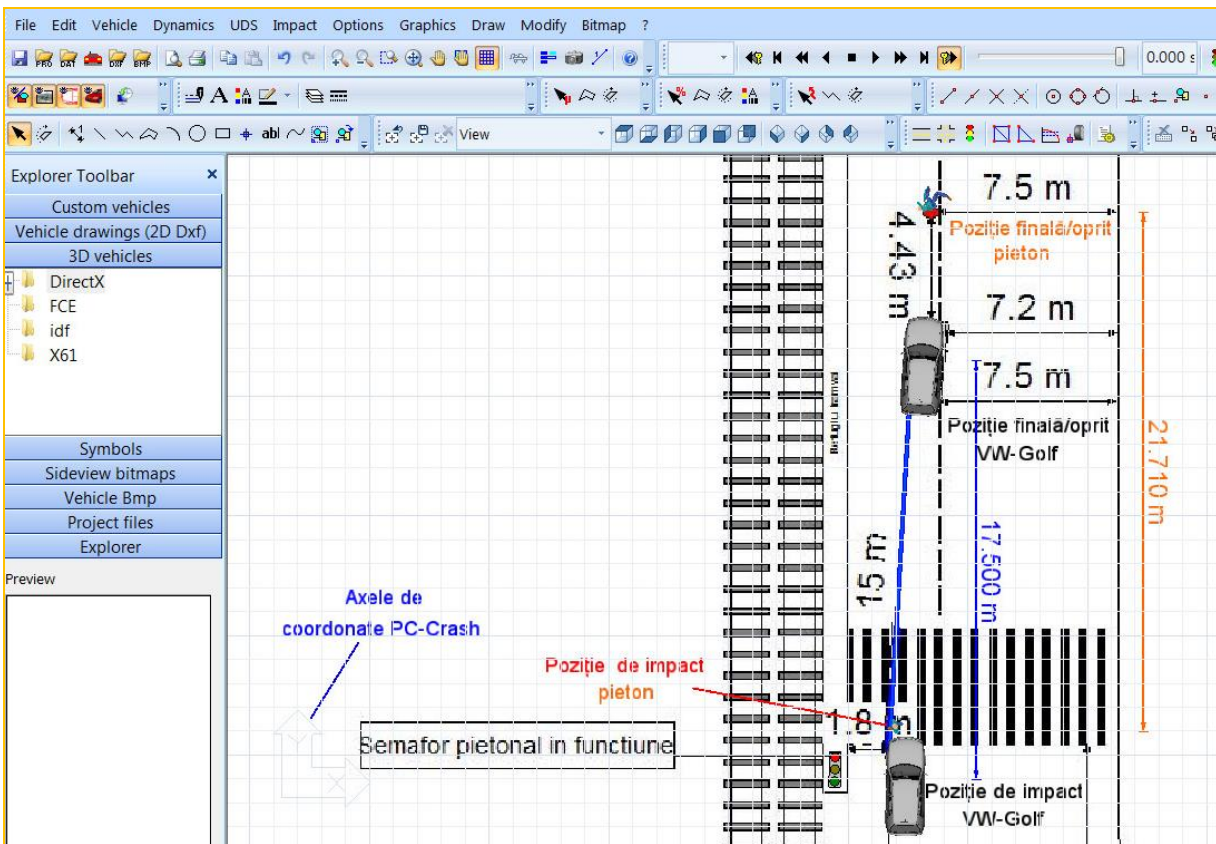


Figura 3.6. Schița locului producerii accidentului

În figura 3.6 se prezintă și distanțele determinate cu programul PC-Crash, respectiv distanța de 17,5 m între poziția de impact și poziția finală a autoturismului (măsurată în raport cu centrul de greutate al autoturismului), precum și distanța de 21,71 m între poziția de impact și poziția finală a pietonului (măsurată în raport cu centrul de greutate al pietonului).

Așadar reconstrucția accidentului a fost realizată într-un mediu interactiv, ce a permis înregistrării video în timp real a coliziunii și determinărilor efectuate de poliție cu ocazia cercetării locului accidentului să stea la baza reconstituirii.

În acest mod simularea generată prin metoda de reconstrucție computerizată a putut fi validată pentru varianta dinamică aferentă vitezei de impact a autovehiculului de 44 km/h și vitezei pietonului de 6 km/h, în condițiile în care autoturismul și pietonul s-au oprit în simulare în poziția consemnată de poliție în cercetarea la fața locului, iar pozițiile inițiale și traiectoriile automobilului și pietonului sunt similare celor prezentate în înregistrarea video.

3.2.4.2. Cinematica și dinamica autoturismului

În continuare sunt prezentate rezultatele obținute prin metoda de reconstrucție computerizată a coliziunii utilizând programul PC-Crash. În figura 3.7 se prezintă principalele secvențe aferente reconstrucției computerizate a coliziunii utilizând programul PC-Crash, corespunzătoare dinamicii impactului pietonului cu autovehiculul.

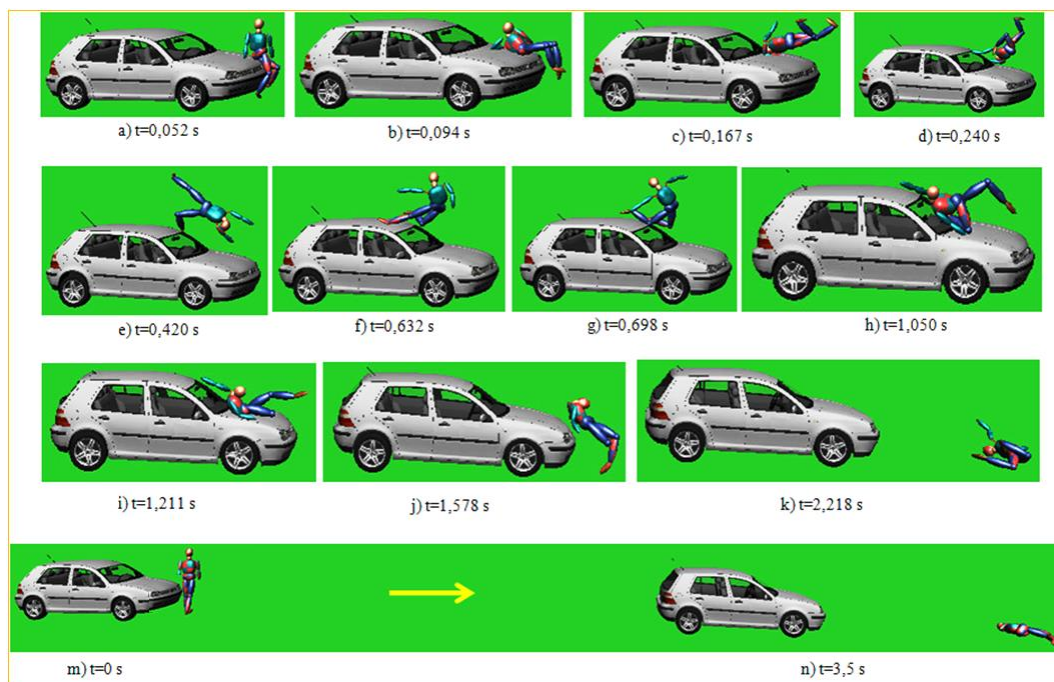


Figura 3.7. Principalele secvențe aferente reconstrucției computerizate a coliziunii utilizând programul PC-Crash, corespunzătoare dinamicii impactului pietonului cu autovehiculul

Lovirea pietonului de către autoturism, la nivelul ambelor membre inferioare, s-a produs la momentul $t=0,052s$, astfel cum este prezentat în figura 3.7.a. În figura 3.7.b este ilustrată preluarea pietonului pe capota motorului, la momentul $t=0,094s$.

La $t=0,167\text{s}$ (fig.3.7.c) pietonul lovește cu capul parbrizul, pentru prima dată, la nivelul inferior al parbrizului (focarul avariilor nr.1 din fig.3.5). Secvențele ilustrate în figurile 3.7.d, 3.7.e, 3.7.f și 3.7.g prezintă proiectarea în aer și rotirea pietonului deasupra zonei parbrizului autoturismului. Ulterior, fiind pe traiectoria descendentă (fig.3.7.h), pietonul lovește a doua oară parbrizul, cu corpul (focarul avariilor nr.2 din fig.3.5). În continuare pietonul ajunge pe capotă, astfel cum se prezintă în figura 3.7.i, apoi acesta se desprinde de autovehicul și cade în fața autoturismului, după cum este ilustrat în figura 3.7.j și figura 3.7.k. În final pietonul ajunge pe carosabil, la $t=3,5\text{ s}$, în poziția de repaus postimpact, care este prezentată în figura 3.7.n. În figura 3.7.m se prezintă poziția relativă autovehicul - pieton la momentul inițial al impactului.

În figura 3.8 se prezintă viteza de deplasare a autoturismului V , distanțele pe axe de coordonate x_a , y_a , z_a și spațiul parcurs de acesta S_a . În figura 3.8.b și figura 3.8.c se redau valorile distanțelor pe cele trei axe de coordonate, iar în figura 3.8.d spațiul parcurs de autoturism din momentul impactului până la oprirea în poziția finală.

Din figura 3.8.a se constată că viteza de impact a autoturismului, stabilită anterior, este $V_a=44\text{ km/h}$, iar acesta a ajuns oprit în poziția finală după un timp de $2,95\text{ s}$, când viteza a devenit nulă. Deoarece durata totală a desfășurării accidentului a fost de $3,5\text{ s}$ (stabilită anterior), rezultă că autoturismul s-a oprit înainte de ajungerea pietonului în poziția finală de repaus. Din acest motiv, graficele prezentate pentru cinematica și dinamica autoturismului au ca final de reprezentare timpul de $2,95\text{ s}$. Din figura 3.8.b rezultă că distanța totală parcursă de autoturism pe axa Ox este $d_{xa}=17,5\text{ m}$, spațiu care este ilustrat în schița prezentată în figura 3.6. Din figura 3.8.c se deduce că distanța totală parcursă de automobil pe axa Oy este $d_{ya}=0,71\text{ m}$.

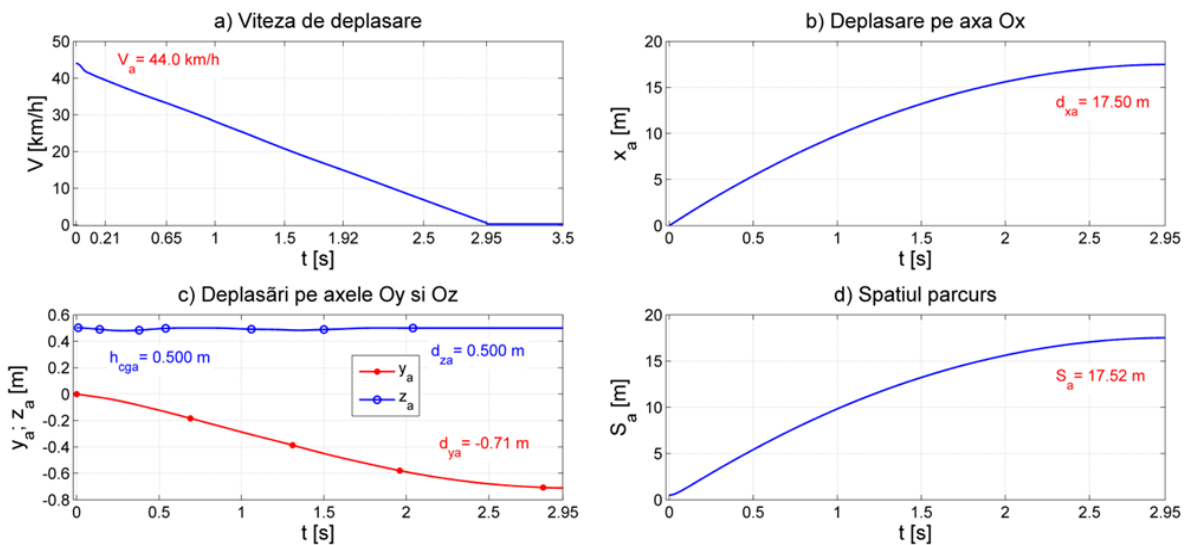


Figura 3.8. Viteza de deplasare, distanțele pe axe și spațiul parcurs de autovehiculul VW Golf (de centrul său de greutate)

În figura 3.9 se prezintă componentele pe axe ale variației vitezei automobilului (acelerații, decelerații). Din figura 3.9 se constată că valoarea cea mai mare a decelerației se realizează pe axa Ox ($-4,8 \text{ m/s}^2$), aceasta fiind datorată atât frânării intense a autoturismului de către conducătorul auto, cât și impactului cu pietonul.

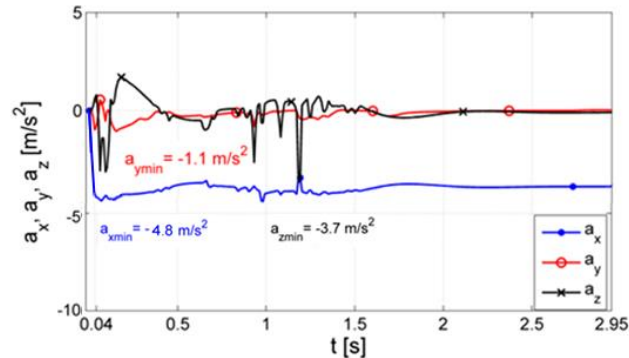


Figura 3.9. Valorile pe axe ale variației vitezei automobilului VW Golf

În figura 3.10.a se prezintă vitezele unghiulare de rotație ale autoturismului, în figura 3.10.b unghiurile de rotație și în figura 3.10.c componentele pe axe ale momentelor exterioare care acționează asupra acestuia. Din figurile 3.10.a și 3.10.b se constată că există toate cele trei mișcări de rotație în jurul axelor autoturismului, dar de amplitudine redusă (unghiuri de rotație mici în figura 3.10.b).

Din figura 3.10.b rezultă că la impactul cu pietonul, autoturismul se înclină către stânga (unghi de ruliu negativ), către în față (unghi de tangaj pozitiv) și se rotește în sens orar (unghi de giratie negativ), cu consecința evoluției postimpact a autoturismului pe o traiectorie către dreapta, ceea ce se coroborează cu urmele prezentate în figura 3.6; primele două mișcări ale autoturismului confirmă impactul în partea din stânga față a autovehiculului (fig.3.4).

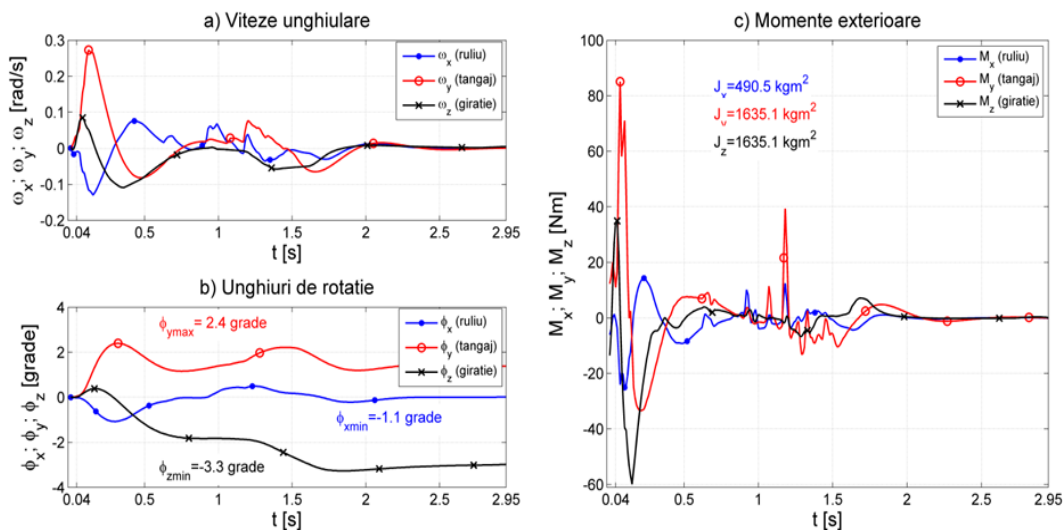


Figura 3.10. Viteze unghiulare și unghiuri de rotație ale autoturismului VW Golf, precum și componentele pe axe ale momentelor exterioare

3.2.4.3. Cinematica, dinamica și biomecanica pietonului

În mod similar, sunt prezentate rezultatele cu referire la pieton, care au fost obținute prin metoda de reconstrucție computerizată a coliziunii utilizând programul PC-Crash.

În figura 3.11.a se prezintă viteza pietonului și în figura 3.11.b și figura 3.11.c se prezintă deplasările pe cele trei axe de coordonate, iar în figura 3.11.d spațiul parcurs de pieton din momentul impactului până la oprirea în poziția finală.

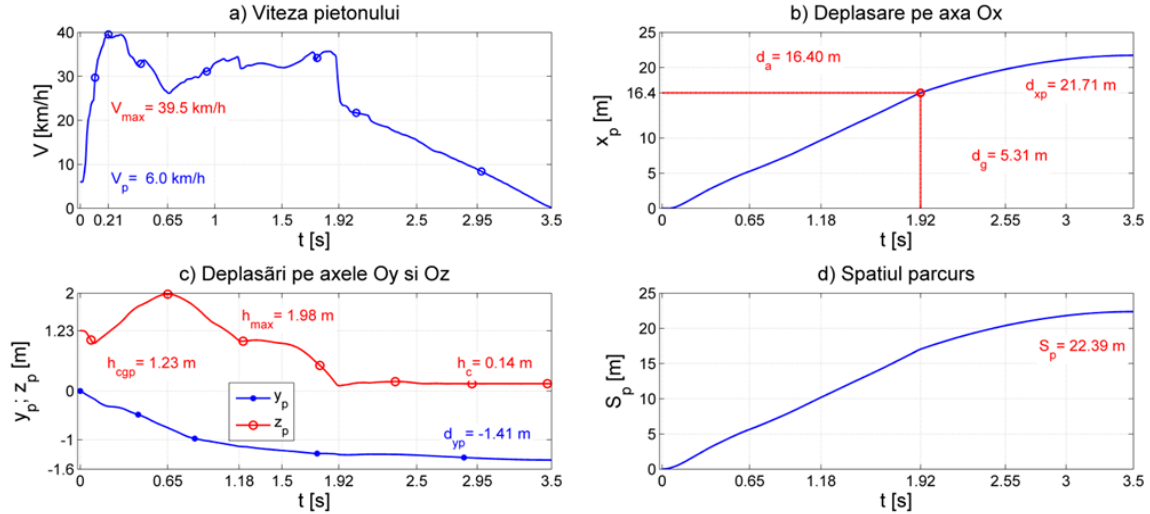


Figura 3.11. Viteza pietonului, distanțele pe axe și spațiul parcurs de pieton (de centrul său de greutate)

În figura 3.11.a se redă și viteza la impact a pietonului, $V_p = 6$ km/h, iar din grafic se constată că după impact, viteza pietonului a crescut până la valoarea de 39,5 km/h, la timpul $t = 0,21$ s.

Din figura 3.11.c se observă că la momentul inițial al impactului graficul deplasării pe verticală (axa Oz) începe la valoarea aferentă înălțimii centrului de greutate al pietonului, $h_{cgp} = 1,23$ m. De asemenea, din figura 3.11.c se mai constată că la timpul $t = 0,65$ s pietonul a ajuns la înălțimea maximă de aruncare $h_{max} = 1,98$ m. Deoarece pornind de la acest moment viteza pietonului începe să crească (fig.3.11.a), rezultă că pietonul după ce a fost proiectat în aer s-a mai ciocnit cu autoturismul, de la care a preluat încă o cantitate de energie (viteza autoturismului la $t = 0,65$ s este mai mare de 30 km/h, astfel cum se observă în fig.3.8.a, iar viteza pietonului este mai mică de 30 km/h, astfel cum se observă în fig.3.11.a).

Din figura 3.11.c se poate constata că la timpul $t = 1,92$ s, pietonul a ajuns pe carosabil, întrucât înălțimea z_p este minimă. În consecință, de la acest moment de timp și până la oprire (la $t = 3,5$ s) pietonul alunecă pe carosabil. Astfel cum rezultă din figura 3.11.c, alunecarea pietonului pe carosabil durează 1,58 s, iar spațiul parcurs în acest interval de timp este $d_g = 5,31$ m.

Așadar din momentul impactului inițial autovehicul - pieton până la momentul când pietonul a ajuns pe carosabil a trecut o perioadă de timp de 1,92 s, iar spațiul parcurs în acest interval de timp este $d_a=16,4$ m. Faza de alunecare a pietonului pe carosabil durează 1,58 s (fig.3.11.c), iar spațiul parcurs în acest interval de timp este $d_g=5,31$ m.

Din figura 3.11.b rezultă că distanța parcursă de pieton pe direcția axei Ox este $d_{xp}=21,71$ m, valoare care a fost prezentată și în figura 3.6.

În figura 3.12.a se prezintă valorile pe cele trei axe de coordonate ale accelerațiilor/decelerațiilor capului (a_x , a_y și a_z) și în figura 3.12.b se prezintă valoarea rezultantei și gradientul acesteia.

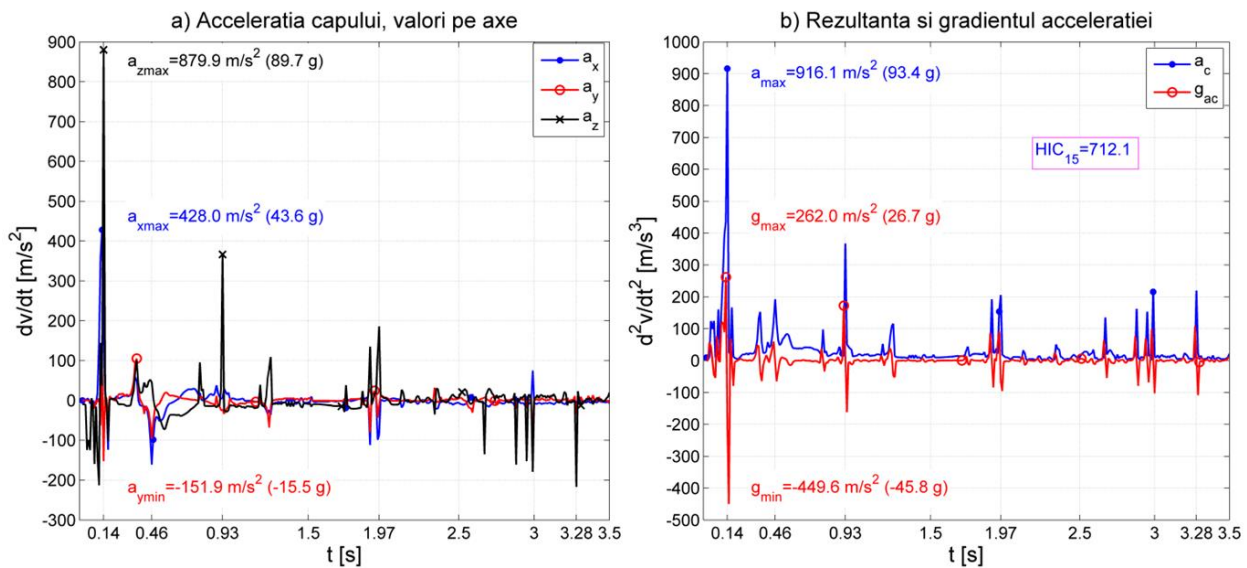


Figura 3.12. Derivatele vitezelor capului pietonului (accelerații/decelerații), valori pe axe, rezultanta și gradientul accelerației

În figura 3.12.a se redau și nivelele maxime ale valorilor accelerațiilor pe cele trei axe, prin valori absolute și prin valori raportate la accelerația gravitațională g . De asemenea, în figura 3.12.b sunt prezentate valoarea maximă a rezultantei a_{max} și valorile limită ale gradientului acesteia, g_{max} și g_{min} . După cum se constată din figura 3.12.a, accelerația longitudinală a capului a_x depășește accelerația maxim tolerată ($43,6 > 30g$ [40]), la fel și accelerația laterală a_y este mai mare decât accelerația tolerată de om ($15,5 > 9g$ [40]).

Așadar capul pietonului este supus unor accelerații mai mari decât cele tolerate. În plus, din figura 3.12.b se observă că valoarea criteriului HIC_{15} este mai mare decât cea maxim tolerată ($712,1 > 700$). Pentru persoane în vârstă de cel puțin 6 ani se acceptă ca limită maximă a toleranței $HIC_{15} = 700$ [40]. Depășirea criteriilor de toleranță justifică traumatismele produse la nivelul capului pietonului, astfel cum au fost reliefate la consecințele accidentului rutier (paragraful 3.2.3).

În figura 3.13 se prezintă forțele de contact ale toracelui (bustului) pietonului.

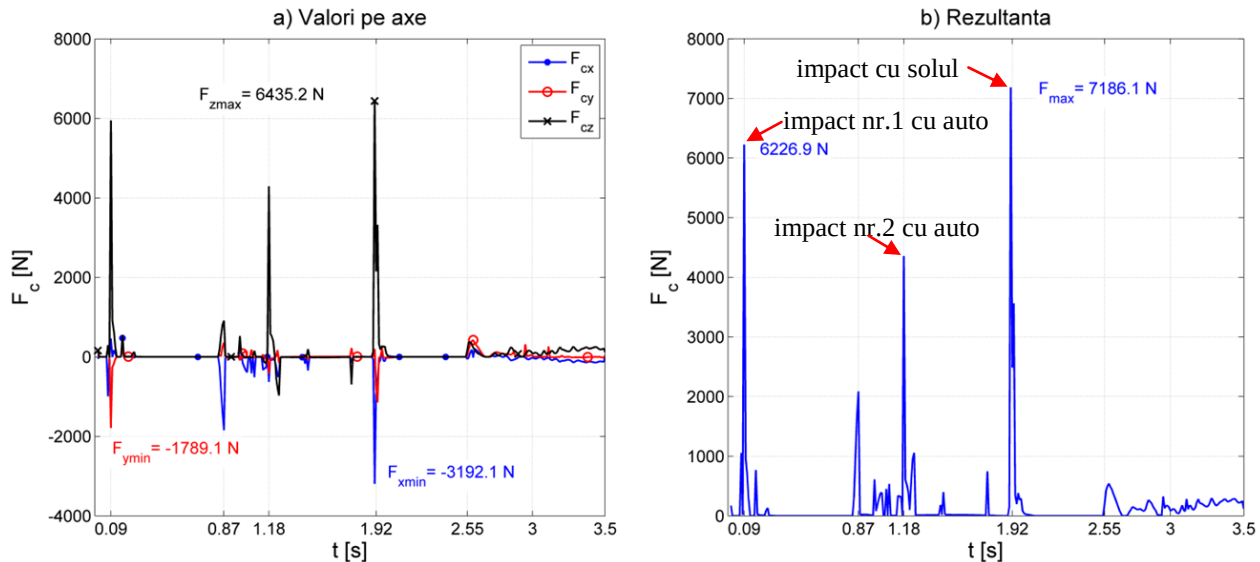


Figura 3.13. Forțele de contact ale toracelui (bustului) pietonului, valori pe cele trei axe și forța rezultantă

Din figura 3.13.b rezultă că la torace apar fracturi de coaste, deoarece forța de contact este mai mare decât cea tolerată ($7186,1 > 6600$ N [107]).

Forța de contact la nivelul toracelui care este mai mare decât forța de contact tolerată justifică existența traumatismului toracic cu contuzie pulmonară stânga, menționat în constatările de ordin medico-legal și evidențiat la consecințele accidentului rutier asupra pietonului (paragraful 3.2.3).

De asemenea, din figura 3.13.b mai rezultă că acest traumatism ar fi putut apare la timpul $t = 1,92$ s, adică atunci când pietonul, ulterior desprinderii de pe autoturism, a lovit suprafața carosabilă, începând să alunece pe aceasta (fig.3.11). Apariția traumatismului la impactul cu autoturismul (la $t = 0,09$ s) este mai puțin probabilă, deoarece valoarea forței de contact este mai redusă decât valoarea tolerată ($6226,9 < 6600$ N).

3.2.4.4. Reconstituirea parametrilor caracteristici accidentului rutier de tip autovehicul - pieton prin metode analitice

Pentru stabilirea unor parametri caracteristici ai accidentelor rutiere care implică pietoni, în literatura de specialitate se prezintă o serie de metode analitice, cu diferite nivele de complexitate, astfel cum s-a prezentat în paragraful 2.6. Aceste relații se vor aplica pentru accidentul rutier analizat cu scopul de a determina posibilitatea evaluării cu suficientă precizie a vitezei de impact a autovehiculului prin utilizarea metodelor analitice.

Rezultatele obținute sunt sintetizate în tabelul 3.1.

Tabelul 3.1.

Denumire metoda	Distanța de proiectare (m)	Viteza autovehiculului (km/h)	Diferența (%)	Obs.
PC-Crash	21,71	44,00	-	Diferența este determinată față de rezultatul obținut prin metoda de reconstrucție computerizată a accidentului (PC-Crash)
Kuhnel	21,71	50,92	15,7	
Rau	21,71	57,52	30,7	
Toor	21,71	53,93	22,6	
Stcherbatcheff	21,71	45,02	2,3	
Fugger	21,71	53,75	22,1	
Searle	21,71	[46,99 – 52,53]	[6,8 – 19,4]	
Schmidt	21,71	52,45	19,2	
Wood	21,71	54,55	23,9	
Rich	21,71	44,81	1,8	

După cum se constată din cele prezentate, pentru acest accident **relația lui Rich** generează cea mai redusă diferență, de 1,8%, astfel încât permite cea mai bună predicție a valorii vitezei de impact a autovehiculului, cu condiția cunoașterii distanței de aruncare și distanței de alunecare ale pietonului.

În afară de aceasta, valori mai apropiate de viteza de impact a autovehiculului sunt generate de relația lui Stcherbatcheff (diferența este 2,3%) și relația lui Searle, cazul vitezei minime (diferența este 6,8%).

3.3. Studiul dinamicii impactului dintre pieton și un autovehicul cu viteză mare de deplasare

3.3.1. Date cu privire la condițiile în care s-a produs accidentul

Accidentul de circulație analizat s-a produs în municipiul București în jurul orei 17³⁰, pe bulevardul Regina Elisabeta în zona intersecției cu str. I. Brezoianu, astfel cum este ilustrat în figura 3.14.

În accident a fost implicat un autoturism marca BMW 525 și un pieton de sex masculin în vârstă de 23 ani, având înălțimea de 1,73 m și masa de 73 kg. La ora producerii accidentului, partea carosabilă, constituită din asfalt, era uscată.

Accidentul rutier a fost filmat în timp real de către o cameră de supraveghere video amplasată în zonă, care înregistrează cu frecvența de 25 cadre/s (fps).

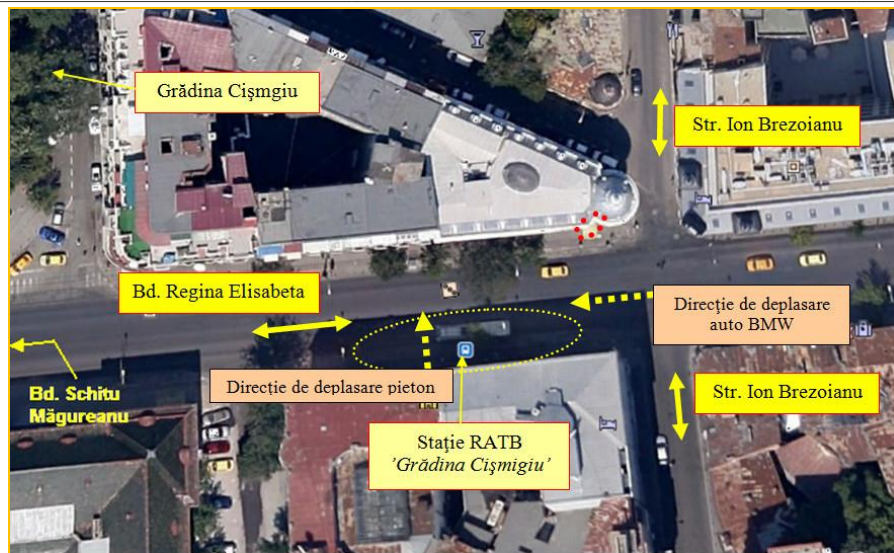


Figura 3.14. Vedere de ansamblu asupra locului în care s-a produs accidentul rutier

3.3.2. Desfășurarea accidentului rutier

Accidentul fiind filmat în timp real de către camera de supraveghere video, a fost posibilă reconstituirea desfășurării acestuia. În figura 3.15 este prezentat un cadru din care se poate observa momentul în care pietonul, fiind în traversarea străzii, apare în fugă prin spatele autobuzului oprit în stație, iar autoturismul BMW se deplasează pe sensul opus de circulație față de sensul de mers al autobuzului.

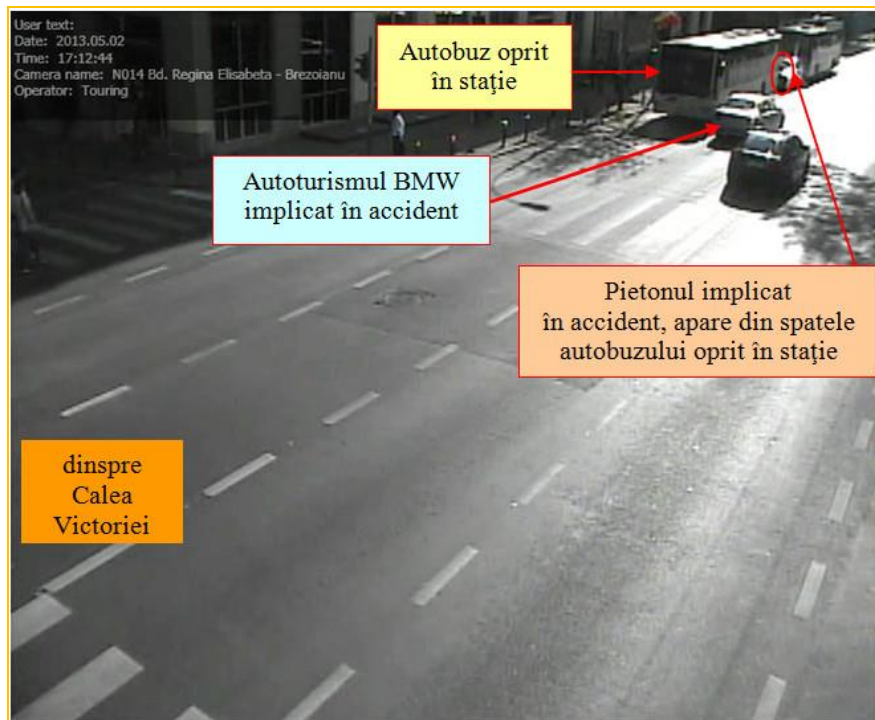


Figura 3.15. Secvența din înregistrarea video a accidentului, ce ilustrează momentul în care pietonul apare în fugă prin spatele autobuzului oprit în stație

Înregistrarea în timp real a accidentului rutier a permis și stabilirea cu precizie a duratei totale a accidentului, și anume 2,9 s de la momentul inițial al impactului autovehicul - pieton și până în momentul opririi acestora din mișcare.

3.3.3. Consecințele accidentului rutier

Accidentul rutier analizat a avut ca urmări avariarea autoturismului BMW 525 și vătămarea corporală a pietonului, urmată de decesul acestuia.

Avariile produse la autoturismul BMW sunt ilustrate în figura 3.16, unde s-a notat: A - urme de deformare plastică la nivelul capotei motor situate în partea din stânga; B - grilele dintre faruri rupte și desprinse din suporti; C - avarii prezente la nivelul parbrizului, situate în partea inferioară, către zona din stânga; D - farul stânga față avariat; E - suportul plăcuței de înmatriculare rupt în partea din stânga.



Figura 3.16. Avariile produse la autoturismul BMW în urma impactului cu pietonul

Consecințele accidentului asupra pietonului sunt reliefate prin constatările de ordin medico-legal, astfel:

- traumatism cranio-cerebral grav (G.C.S.=3 puncte);
- traumatism toracic;
- ruptură renală stânga;
- fractura ambelor oase gamba dreaptă.

3.3.4. Reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier

3.3.4.1. Considerații generale

În mod similar, pentru reconstituirea parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului rutier analizat s-a utilizat metoda de reconstrucție computerizată a coliziunii cu ajutorul programului PC-Crash 10.1.

Schița locului producerii accidentului este prezentată în figura 3.17. Aceasta conține măsurătorile efectuate de poliție la locul producerii accidentului, precum și poziția de impact și pozițiile finale în care s-au oprit, pe carosabil, autoturismul și pietonul.

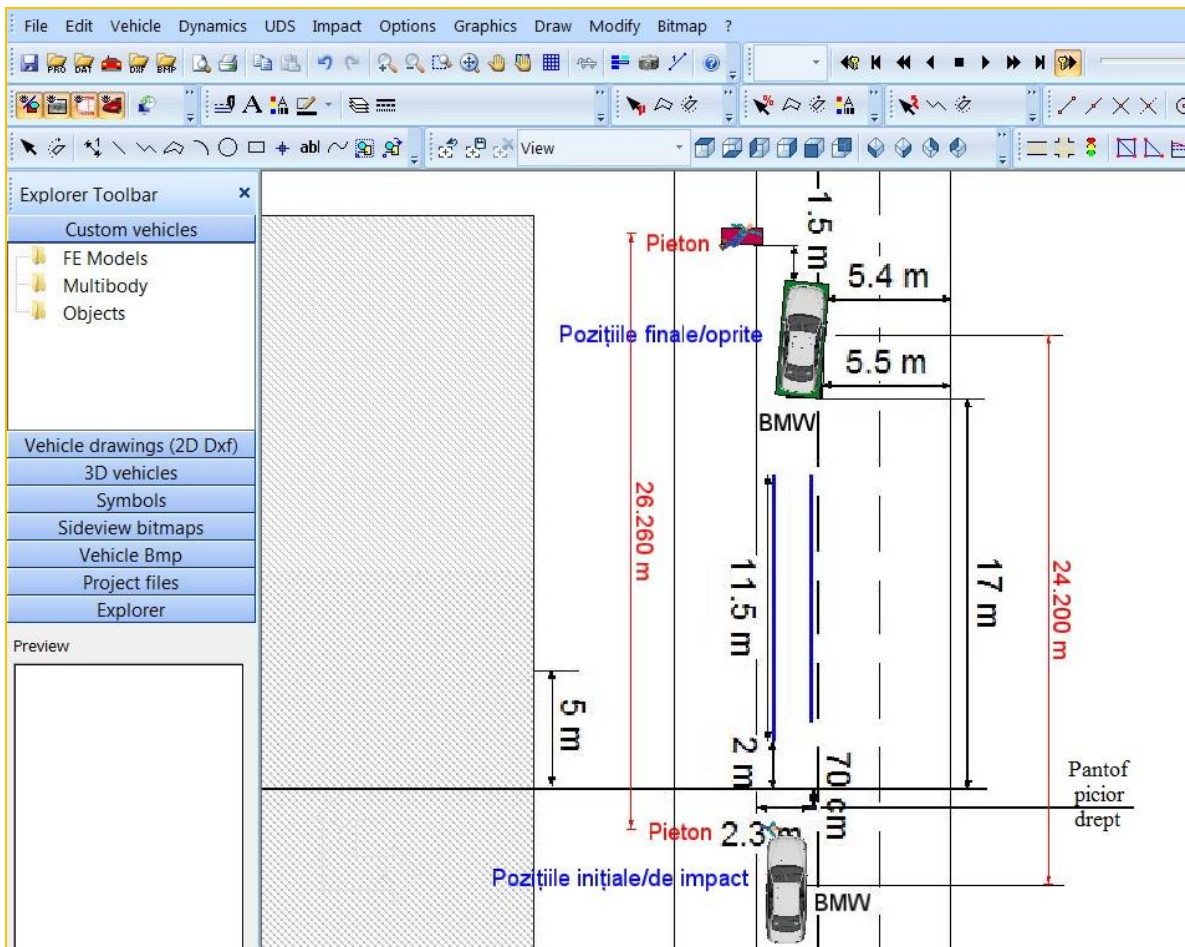


Figura 3.17. Schița locului producerii accidentului

În figura 3.17 se prezintă și distanțele determinate cu programul PC-Crash (facilitate oferită de aplicație), respectiv: distanța de 24,20 m între poziția de impact și poziția finală a autoturismului (măsurată în raport cu centrul de greutate al autoturismului) și distanța de 26,26 m între poziția de impact și poziția finală a pietonului (măsurată în raport cu centrul de greutate al pietonului).

Așadar reconstrucția accidentului a fost realizată într-un mediu interactiv, ce a permis înregistrării video în timp real a coliziunii și determinărilor efectuate de poliție cu ocazia cercetării locului accidentului să stea la baza reconstituirii.

În acest mod simularea generată prin metoda de reconstrucție computerizată a putut fi validată pentru varianta dinamică aferentă vitezei de impact a autovehiculului de 69,40 km/h și vitezei pietonului de 9 km/h, în condițiile în care autoturismul și pietonul s-au oprit în simulare în poziția consemnată de poliție în cercetarea la fața locului, iar pozițiile inițiale și traiectoriile automobilului și pietonului sunt similare celor prezentate în înregistrarea video.

3.3.4.2. Cinematica și dinamica autoturismului

În continuare sunt prezentate rezultatele obținute prin metoda de reconstrucție computerizată a coliziunii utilizând programul PC-Crash.

Pentru a oferi o imagine de ansamblu asupra desfășurării accidentului rutier, în figura 3.18 sunt ilustrate principalele secvențe aferente reconstrucției computerizate a coliziunii utilizând programul PC-Crash, corespunzătoare dinamicii impactului pietonului cu autovehiculul.

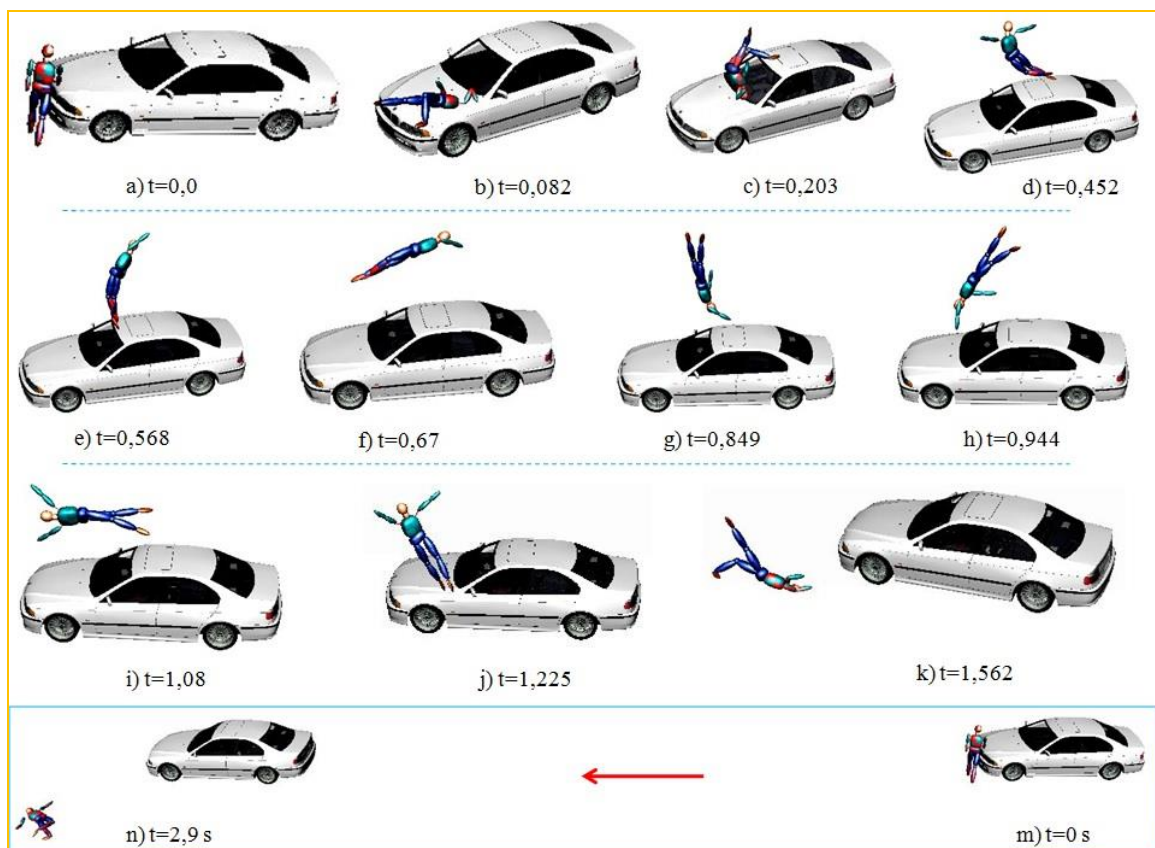


Figura 3.18. Principalele secvențe aferente reconstrucției computerizate a coliziunii utilizând programul PC-Crash, corespunzătoare dinamicii impactului pietonului cu autovehiculul

În figura 3.19 se prezintă viteza de deplasare a autoturismului V , distanțele pe axele de coordonate x_a , y_a , z_a și spațiul parcurs de acesta S_a . În figura 3.19.b și figura 3.19.c se redau valorile distanțelor pe cele trei axe de coordonate, iar în figura 3.19.d spațiul parcurs de autoturism din momentul impactului până la oprirea în poziția finală.

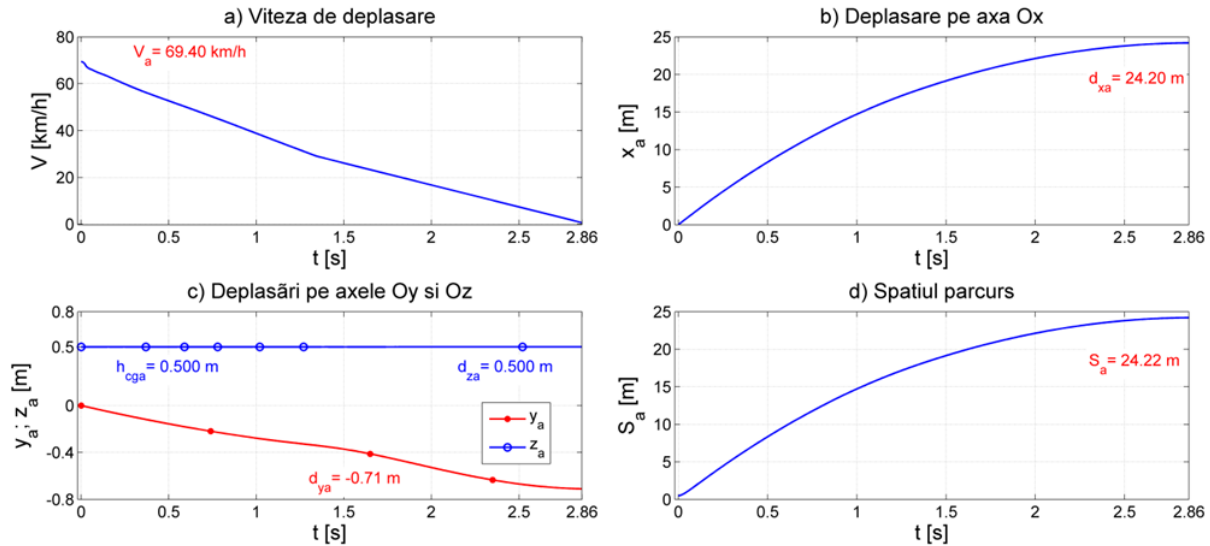


Figura 3.19. Viteza de deplasare, distanțele pe axe și spațiul parcurs de autovehiculul BMW 525 (de centrul său de greutate)

3.3.4.3. Cinematica, dinamica și biomecanica pietonului

În mod similar, în figura 3.20 sunt prezentate rezultatele cu referire la pieton, care au fost obținute prin metoda de reconstrucție computerizată a coliziunii utilizând programul PC-Crash.

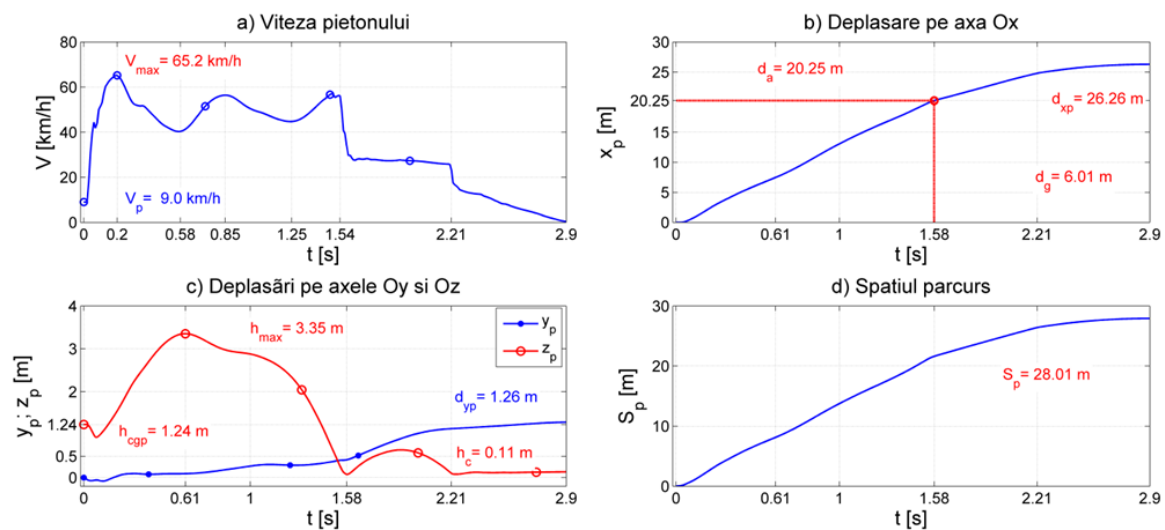


Figura 3.20. Viteza pietonului, distanțele pe axe și spațiul parcurs de pieton (de centrul său de greutate)

În figura 3.20.a se prezintă viteza pietonului și în figura 3.20.b și figura 3.20.c se prezintă deplasările pe cele trei axe de coordonate, iar în figura 3.20.d spațiul parcurs de pieton din momentul impactului până la oprirea în poziția finală.

În figura 3.20.a se redă și viteza la impact a pietonului, $V_p=9$ km/h, iar din grafic se constată că după impact, viteza pietonului a crescut până la valoarea de 65,20 km/h, la momentul $t=0,21$ s.

Din figura 3.20.c se observă că la momentul inițial al impactului graficul deplasării pe verticală începe la valoarea aferentă înălțimii centrului de greutate al pietonului, $h_{cgp}=1,24$ m. De asemenea, din figura 3.20.c se mai constată că la momentul $t=0,61$ s pietonul a ajuns la înălțimea maximă de aruncare $h_{max}=3,35$ m, iar la momentul $t=1,58$ s pietonul a ajuns pe carosabil, deoarece înălțimea z_p este minimă. Ulterior, până la oprire (la $t=2,9$ s) pietonul alunecă pe carosabil, la început cu o săltare a corpului (fig.3.20.c). Astfel cum rezultă din figura 3.20.c, alunecarea pietonului pe carosabil durează 1,32 s, iar spațiul parcurs în acest interval de timp este $d_g=6,01$ m.

Așadar din momentul impactului inițial autovehicul - pieton până la momentul când pietonul a ajuns pe carosabil a trecut o perioadă de timp de 1,58 s, iar spațiul parcurs în acest interval de timp este $d_a=20,25$ m. Faza de alunecare a pietonului pe carosabil durează 1,32 s (fig.3.20.c), iar spațiul parcurs în acest interval de timp este $d_g=6,01$ m.

Din figura 3.20.b rezultă că distanța parcursă de pieton pe direcția axei Ox este $d_{xp}=26,26$ m, care a fost prezentată și în figura 3.17.

În figura 3.21.a se prezintă valorile pe cele trei axe de coordonate ale accelerațiilor/decelerațiilor capului (a_x , a_y și a_z) și în figura 3.21.b se prezintă valoarea rezultantei și gradientul acesteia.

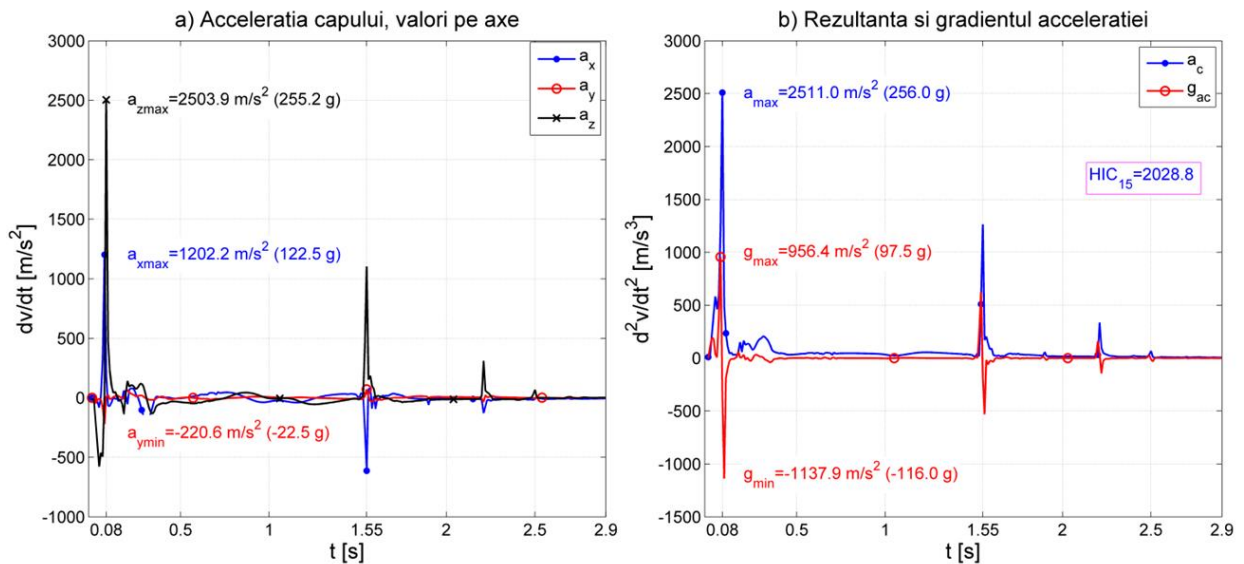


Figura 3.21. Derivatele vitezelor capului pietonului (accelerații/decelerații), valori pe axe, rezultanta și gradientul accelerației

În figura 3.21.a se redau și nivelele maxime ale valorilor accelerațiilor pe cele trei axe, prin valori absolute și prin valori raportate la accelerația gravitațională g . De asemenea, în figura 3.21.b sunt prezentate valoarea maximă a rezultantei a_{max} și valorile limită ale gradientului acesteia, g_{max} și g_{min} .

După cum se constată din figura 3.21.a, accelerația longitudinală a capului a_x depășește semnificativ accelerația maxim tolerată ($122,5 > 30$ g), la fel și accelerația laterală a_y este mai mare decât accelerația tolerată de om ($22,5 > 9$ g).

Așadar capul pietonului este supus unor accelerații mai mari decât cele tolerate. Din figura 3.21.b se observă că valoarea criteriului HIC_{15} este cu mult mai mare față de cea maxim tolerată de om ($2028,8 > 700$). Amploarea semnificativă a depășirii criteriilor de toleranță justifică traumatismele severe la nivelul capului pietonului (traumatism cranio-cerebral grav), astfel cum a fost specificat la consecințele accidentului rutier (paragraful 3.3.3).

Din figura 3.22.b se constată că forța de contact a capului depășește cu mult valoarea forței maxim admise ($11033,6 > 6600$ N). După cum se observă din figura 3.22.a, componenta de pe axa Oz are contribuția cea mai mare ($F_{zmax} = 10579,6$ N), ceea ce relevă faptul că vătămarea severă a capului pietonului s-a produs, la $t = 0,08$ s, când acesta a lovit baza parbrizului și nu în momentele în care pietonul a lovit cu capul de carosabil, când componentele forței de contact au valori mult mai reduse, respectiv la $t = 1,55$ s și $t = 2,21$ s.

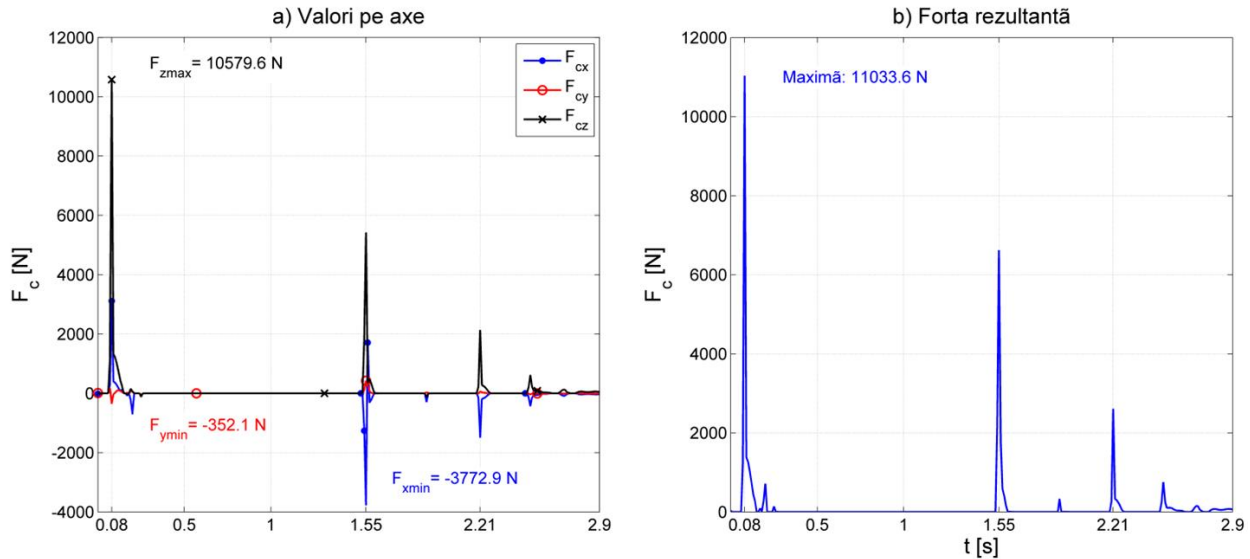


Figura 3.22. Forțele de contact ale capului pietonului, valori pe cele trei axe și forța rezultantă

În figura 3.23.a se prezintă valorile pe cele trei axe de coordonate ale accelerațiilor/decelerațiilor toracelui pietonului (a_x , a_y și a_z) și în figura 3.23.b se prezintă valoarea rezultantei acestora. În figura 3.23.a se redau și nivelele maxime ale valorilor accelerațiilor pe cele trei axe, prin valori absolute și prin valori raportate la accelerația gravitațională g .

După cum se constată din figura 3.23.a, accelerația longitudinală a toracelui a_x nu depășește accelerația maxim tolerată ($27,1 < 30$ g), dar accelerația laterală a_y este de peste două ori mai mare decât accelerația maxim tolerată de om ($19,8 > 9$ g). În plus, din figura 3.23.b se observă că valoarea criteriului CTI (indicele toracic combinat) este mai mare decât cea maxim tolerată de om ($1,86 > 1,0$).

Așa cum se cunoaște din literatura de specialitate [21], severitatea vătămării toracelui se evaluează prin determinarea indicelui toracic combinat CTI (Combined Thoracic Index), definit prin relația:

$$CTI = \frac{a_{\max}}{a_c} + \frac{d_{\max}}{d_c} \quad (3.1)$$

în care: $a_{\max}$ - valoarea maximă a decelerației toracelui (exprimată prin raportare la accelerația gravitațională g), $d_{\max}$ - deformația maximă antero-posterioară, a_c - decelerația critică acceptată, d_c - deformația critică acceptată.

Valorile critice menționate se prezintă în literatura de specialitate. De exemplu, pentru bărbații de statură medie se adoptă $a_c=60g$, $d_c=63$ mm [40].

Valoarea maxim admisă pentru criteriul CTI este egală cu unitatea ($CTI=1$).

Depășirea criteriilor de toleranță justifică traumatismul toracic reliefat la consecințele accidentului rutier (paragraful 3.3.3).

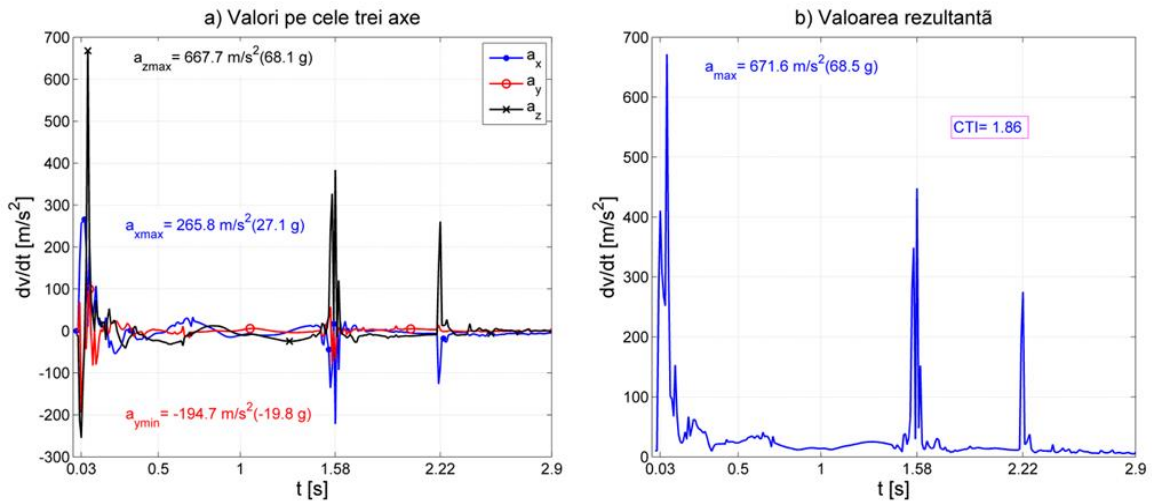


Figura 3.23. Derivatele vitezelor toracelui pietonului (acelerații/decelerații), valori pe axe, valoarea rezultantă și indicele toracic combinat (CTI)

În figura 3.24 se prezintă forțele de contact ale toracelui (bustului) pietonului. După cum se constată din figura 3.24.b, forța de contact a toracelui depășește de peste două ori forța de contact maxim admisă ($13427,2 > 6600$ N).

În figura 3.24 se observă că pe axa Oz, componenta forței de contact de pe axa respectivă are contribuția cea mai mare ($F_{z\max}=12987,5$ N), având valori ridicate la $t=0,03$ s, când pietonul se lovește de capota automobilului, la $t=1,58$ s și $t=2,21$ s, când pietonul se lovește de carosabil.

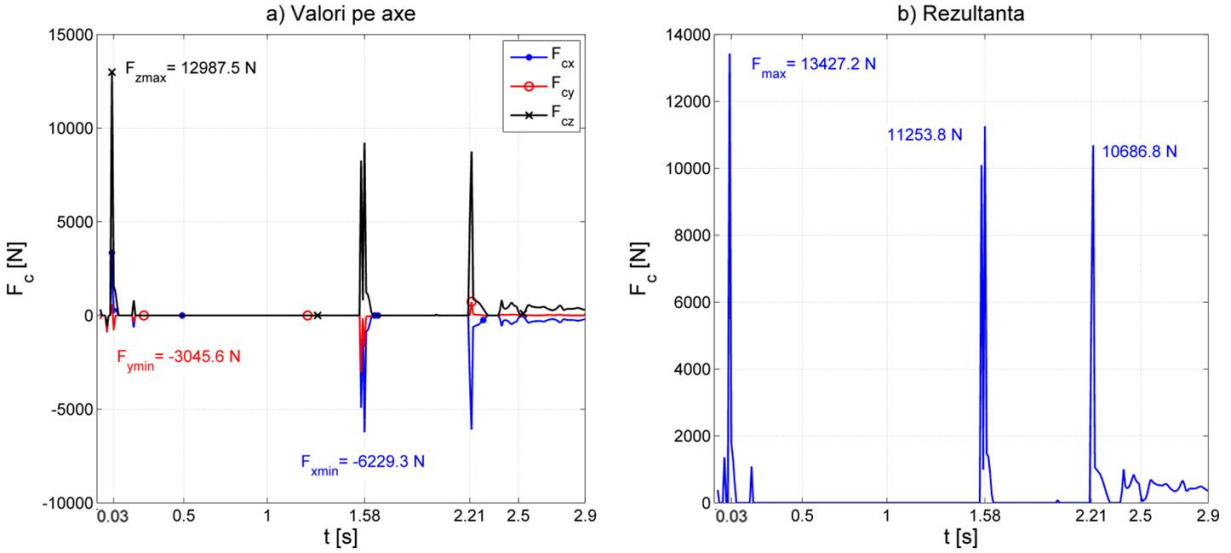


Figura 3.24. Forțele de contact ale toracelui (bustului) pietonului, valori pe cele trei axe și forța rezultantă

În figura 3.25.a se prezintă forța de contact la nivelul gambei dreapta, iar în figura 3.25.b forța de contact la nivelul gambei stânga. Din aceste grafice rezultă că numai la gamba din dreapta se depășește valoarea maxim tolerată de om ($4502,7 > 4100$ N [40]), ceea ce justifică fractura existentă la ambele oase ale gambei, menționată la consecințele accidentului rutier (paragraful 3.3.3).

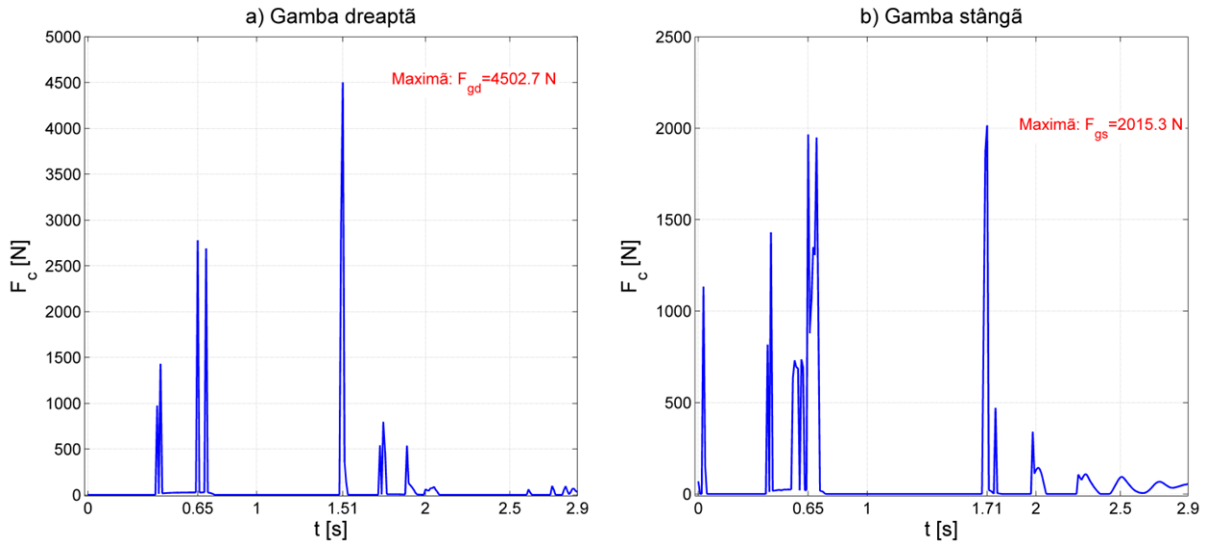


Figura 3.25. Forțele de contact la nivelul gambelor pietonului, valori pe cele trei axe și forța rezultantă

În figura 3.26 se prezintă distanțele parcurse pe verticală (înălțimile) de către toracele pietonului (unde se află centrul de greutate), capul și tălpile picioarelor (extremitățile membrilor inferioare ale corpului).

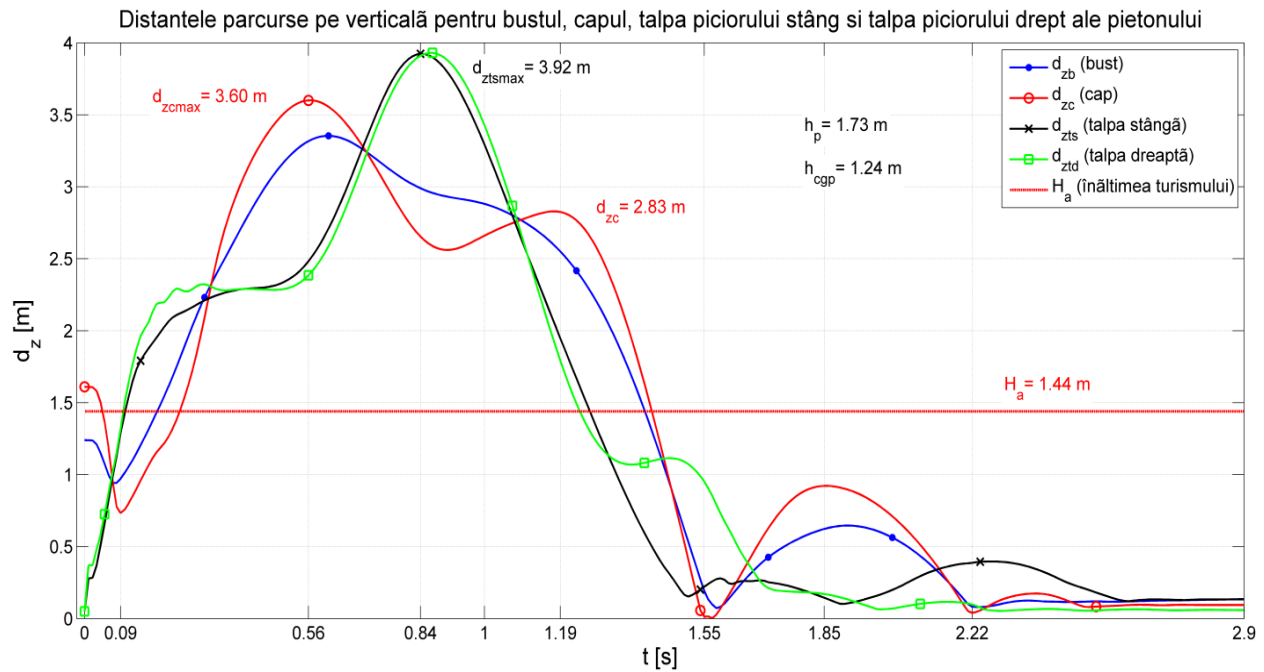


Figura 3.26. Distanțe parcurse pe verticală de către corpul pietonului

Graficul prezentat în figura 3.26 confirmă faptul că există o perioadă de timp când pietonul se află complet deasupra autoturismului, care are înălțimea maximă $H_a = 1,44 \text{ m}$.

3.3.4.4. Reconstituirea parametrilor caracteristici accidentului rutier de tip autovehicul - pieton prin metode analitice

În acest scop se procedează similar accidentului prezentat în capitolul 3.3, fiind analizată posibilitatea evaluării cu suficientă precizie a vitezei de impact a autovehiculului prin utilizarea metodelor analitice reliefate în literatura de specialitate, care au diferite nivele de complexitate, astfel cum s-a prezentat în paragraful 2.6.

Majoritatea acestor ecuații relaționează viteza autovehiculului din momentul impactului cu distanța de proiectare a pietonului, pentru situațiile în care acesta este lovit de partea frontală a autoturismului, astfel cum s-a produs și în accidentul rutier analizat.

După cum se constată din cele prezentate, pentru acest accident **relația lui Kuhnel** generează cea mai redusă diferență, de 0,1%, astfel încât permite cea mai bună predicție a valorii vitezei de impact a autovehiculului.

De asemenea, valori mai apropiate de viteza de impact a autovehiculului sunt generate de relația lui Wood (diferența este 1,5%), relația lui Schmidt (diferența este 1,5%) și relația lui Searle, cazul vitezei maxime (diferența este 1,4%).

Rezultatele obținute sunt sintetizate în tabelul 3.2.

Tabelul 3.2.

Denumire metoda	Distanța de proiectare (m)	Viteza autovehiculului (km/h)	Diferența (%)	Obs.
PC-Crash	26,26	69,40	-	Diferența este determinată față de rezultatul obținut prin metoda de reconstrucție computerizată a accidentului (PC-Crash)
Kuhnel	26,26	69,30	-0,1	
Rau	26,26	63,93	-7,8	
Toor	26,26	60,56	-12,7	
Stcherbatcheff	26,26	66,74	-3,8	
Fugger	26,26	60,30	-13,1	
Searle	26,26	[56,01 – 68,37]	[-19,3 – -1,4]	
Schmidt	26,26	68,34	-1,5	
Wood	26,26	70,44	1,5	
Rich	26,26	59,12	-14,8	

Având în vedere și accidentul analizat în capitolul anterior, se poate concluziona că în cele două cazuri prezentate niciuna din relațiile analitice nu poate fi folosită cu caracter de generalitate.

Relațiile analitice iau în considerație un număr redus de parametri ce influențează traiectoria de proiectare a pietonului. Din analiza celor două accidente rutiere, prezentată în acest capitol și în capitolul anterior, se poate concluziona că niciuna din aceste relații nu poate fi folosită cu caracter de generalitate.

Având în vedere aceste limitări se impune utilizarea mai multor relații analitice, astfel încât să poată fi evaluată o valoare a vitezei de impact a autovehiculului din cadrul unui interval de valori. Pentru o mai mare acuratețe aceste relații analitice se utilizează împreună cu alte modele de calcul, cum sunt metodele analitice cu rezolvare numerică dintre care, în lucrare, s-a prezentat metoda computerizată utilizând programul PC-Crash.

Conchizînd, în condițiile în care coliziunile dintre autovehicule și pietoni sunt guvernate de fenomene complexe, care nu pot fi modelate cu exactitate, prin comparație cu metodele analitice de reconstituire a coliziunii, metodele computerizate, care iau în considerație un număr semnificativ mai mare de parametri de intrare, inclusiv pentru structura multicorp aferentă pietonului, pot constitui un instrument corespunzător de analiză, ce permite validarea determinărilor analitice și emiterea unor considerații finale cu caracter concluziv, prin obținerea de informații tehnice care să reducă gradul de incertitudine referitor la parametrii ce definesc mecanismul și dinamica producerii accidentelor în care sunt implicați pietonii. Prin utilizarea sistemelor multicorp, astfel cum s-a prezentat în lucrare, este de asemenea posibilă corelarea leziunilor pietonului cu amploarea avariilor produse autovehiculului.

Capitolul 4

Cercetări experimentale ale accidentelor rutiere în care sunt implicate autovehicule și pietoni

4.1. Metodologia cercetărilor experimentale

4.1.1. Obiectivele testelor experimentale

Procesul de analiză și reconstrucție a accidentelor rutiere de tip autovehicul-pieton este caracterizat prin existența unor numeroase incertitudini parametrice și funcționale. Impactul produs între autovehicul și pieton reprezintă un fenomen complex, ce poate genera cu precădere vătămări corporale grave și, implicit, daune semnificative.

Pentru aprofundarea acestuia au fost efectuate mai multe teste experimentale care au vizat coliziunea frontală a unui autovehicul cu un pieton, fiind urmărită și corelarea cu mecanismul de impact frontal aferent celor două accidente reale ce au fost analizate în capitolul anterior.

Efectuarea experimentelor s-a putut realiza în urma bunei colaborări cu colectivul Facultății de Autovehicule Rutiere de la Universitatea din Brașov, în acest sens fiind integrat în echipa de teste de coliziune din cadrul facultății.

Obiectivele studiului experimental au fost:

- efectuarea unui set de coliziuni de tip autovehicul-pieton;
- achiziția datelor referitoare la viteza și accelerația autovehiculului, pentru fiecare test, inclusiv în ceea ce privește valorile din timpul impactului;
- analiza impactului cu ajutorul camerei de mare viteză și stabilirea fazelor acestuia;
- determinarea cinematicii pietonului.

4.1.2. Stabilirea scenariului de testare experimentală

În scopul realizării obiectivelor stabilite, scenariile testelor de coliziune au fost următoarele:

A. Testul nr. 1 - Impact din lateral

Manechinul este lovit din lateral de către partea dreapta față a autovehiculului.

B. Testul nr. 2 - Impact din lateral

Manechinul este lovit din lateral de către zona centrală a autovehiculului.

Procesul de proiectare a testelor de coliziune a inclus:

- pregătirea poligonului pentru efectuarea testelor de coliziune;
- pregătirea autovehiculului și a conducătorului auto;
- amplasarea manechinului și autovehiculului conform scenariului de testare;
- montarea și verificarea dispozitivelor de înregistrare video și de achiziție a datelor;
- pornirea dispozitivelor și desfășurarea efectivă a testelor de coliziune conform scenariului stabilit.

4.1.3. Pregătirea experimentului

4.1.3.1. Pregătirea poligonului de încercări

Testele de coliziune au fost efectuate în cadrul poligonului de încercări realizat în zona de parcare a Institutului de Cercetare Dezvoltare Inovare din municipiul Brașov, care este prezentat în figura 4.1.



Figura 4.1. Vedere de ansamblu asupra poligonului de testare

Pentru ca testele de coliziune să poată fi efectuate în condiții de siguranță, poligonul de testare a fost delimitat cu o bandă de separare și s-au realizat următoarele:

- asigurarea spațiului necesar opririi autovehiculului după impact;
- asigurarea protecției conducătorului auto prin echiparea cu îmbrăcăminte adecvată și cu cască de protecție de tip moto;
- asigurarea unui post de intervenție în caz de incendiu și a unui post de asistență tehnică.

4.1.3.2. Pregătirea autovehiculului

În vederea realizării testelor propuse a fost utilizat un autoturism marca Dacia 1310 care a fost pregătit pentru testele de impact, fiind efectuate următoarele lucrări:

- alimentarea autovehiculului cu o cantitate redusă de benzină;
- testarea sistemelor de frânare și de direcție;
- reglarea presiunii în pneuri;
- montarea la autovehicul a sistemului de achiziție de date;
- montarea dispozitivului GPS pe plafonul autovehiculului;
- marcarea jantelor conform sistemului adoptat de EuroNCAP;
- marcarea suprafeței exterioare a caroseriei.

4.1.3.3. Pregătirea manechinului

În cadrul realizării testelor de coliziune, manechinul reprezintă unul dintre cele mai importante dispozitive, întrucât pe acesta se efectuează analiza privind comportamentul pietonului în timpul impactului.

În ceea ce privește manechinul, în vederea efectuării testelor de coliziune s-au realizat următoarele operațiuni:

- în centrul de greutate al capului s-a montat un accelerometru tri-axial;
- în interiorul toracelui manechinului s-a montat un dispozitiv de achiziție a datelor;
- etalonarea dispozitivului și cântărirea manechinului;
- montarea pe manechin a unor markeri de tip EuroNCAP, pentru a se putea monitoriza mai facil în cadrul analizei video zonele de interes (cap, torace);
- verificarea conexiunilor realizate prin cabluri la dispozitivele de înregistrare a datelor;
- realizarea unui dispozitiv de susținere care să permită ca manechinul să poată fi menținut în poziție verticală până în momentul coliziunii.

4.1.4. Desfășurarea testelor de coliziune

4.1.4.2. Desfășurarea testului nr. 1

Autovehiculul cu partea dreapta față a colizionat manechinul amplasat cu partea din stânga către frontala autovehiculului care a fost accelerat până la viteza de circa 30 km/h și frânat din faza de impact. Configurația acestui test este prezentată în figura 4.2.

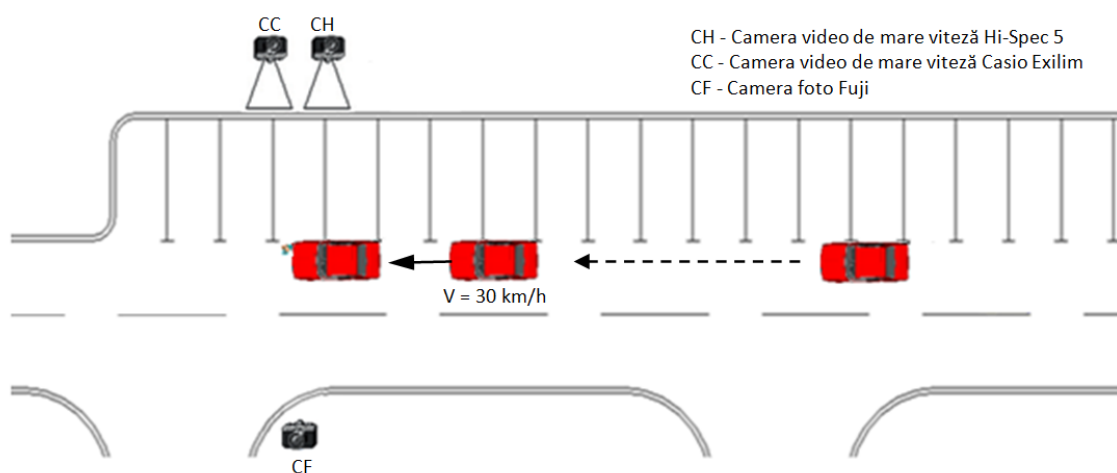


Figura 4.2. Testul nr. 1 - schema privind configurația de impact

Parametrii cinematici de interes, care au fost înregistrați în cadrul testelor de coliziune au fost: distanța de proiectare a pietonului, accelerația/decelerația pietonului la nivelul capului și toracelui, viteza autovehiculului, inclusiv viteza de impact și deplasarea pietonului în timpul coliziunii.

În urma realizării primului test, pe baza analizei înregistrărilor video, în ceea ce privește cinematica pietonului s-au distins următoarele faze ale coliziunii:

- A) Faza 1 - în timpul căreia bara de protecție și extremitatea frontală a capotei ajung la nivelul membrelor inferioare ale pietonului;
- B) Faza 2 - urmare a contactului cu bara de protecție din față a autovehiculului, produs sub nivelul centrului de masă al pietonului, picioarele sunt accelerate rapid astfel încât se imprimă pietonului o mișcare de rotație în jurul axei Oy, acesta fiind preluat pe capotă;
- C) Faza 3 - faza de zbor a pietonului, ulterior impactului cu capota autovehiculului;
- D) Faza 4 - în timpul căreia pietonul cade pe sol, ajungând în poziția de repaus.

În figura 4.3 se prezintă fazele impactului aferente primului test experimental. Se poate observa că impactul cu pietonul s-a produs în zona farului dreapta față. În acest caz se poate constata existența fazei de zbor a pietonului. Această fază se datorează atât vitezei de impact a autovehiculului, cât și frânării energice postimpact.

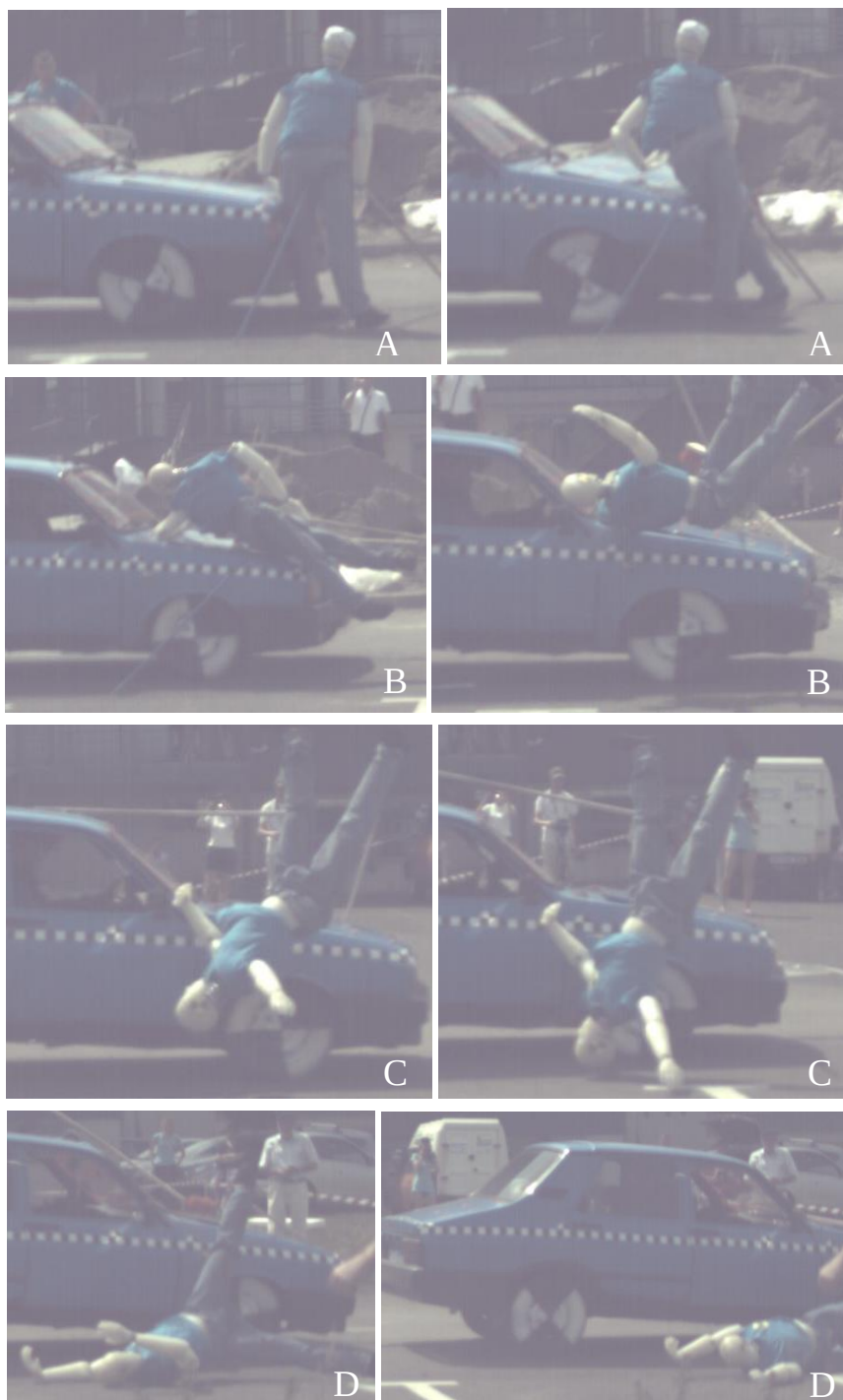


Figura 4.3. Fazele coliziunii din cadrul testului experimental nr. 1

4.2. Achiziția datelor și rezultatele obținute pe cale experimentală

4.2.1. Achiziția datelor experimentale

4.2.1.1. Achiziția datelor din testul de coliziune nr. 1

În cadrul testului de coliziune nr. 1, viteza autovehiculului a fost preluată din sistemul de achiziție a datelor montat pe autoturism, diagrama de viteză fiind ilustrată în figura 4.4. În diagrama de viteză se poate observa că autovehiculul a avut o viteză maximă de 30,21 km/h.

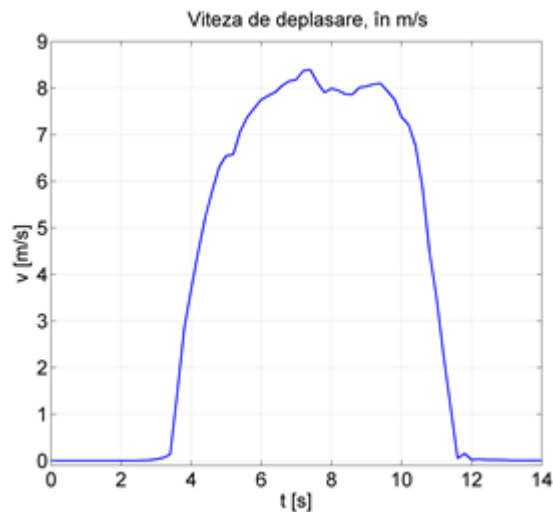


Figura 4.4. Viteza autoturismului în testul de coliziune nr. 1

Accelerațiile la nivelul capului și toracelui pietonului, înregistrate în cadrul testului de coliziune au fost extrase din programul dispozitivului de achiziție a datelor PIC DAQ. Diagrama de accelerații la nivelul capului pietonului pentru testul de coliziune nr. 1 se prezintă în figura 4.5 și diagrama de accelerații la nivelul toracelui se prezintă în figura 4.6. Distanța de proiectare a pietonului s-a măsurat la valoarea de 7,3 m.

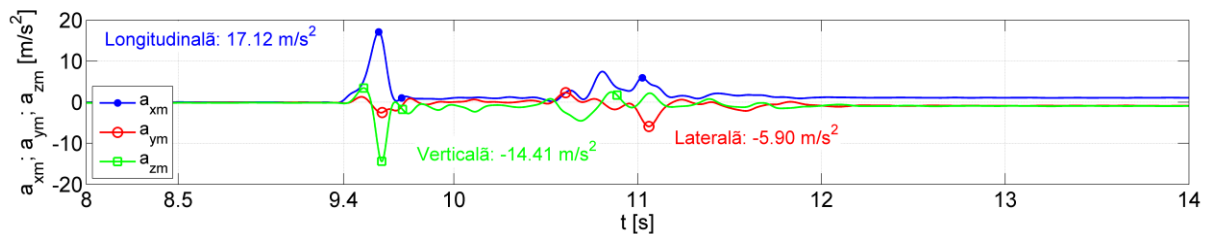


Figura 4.5. Diagrama de accelerații la nivelul capului manechinului pentru testul de coliziune nr. 1

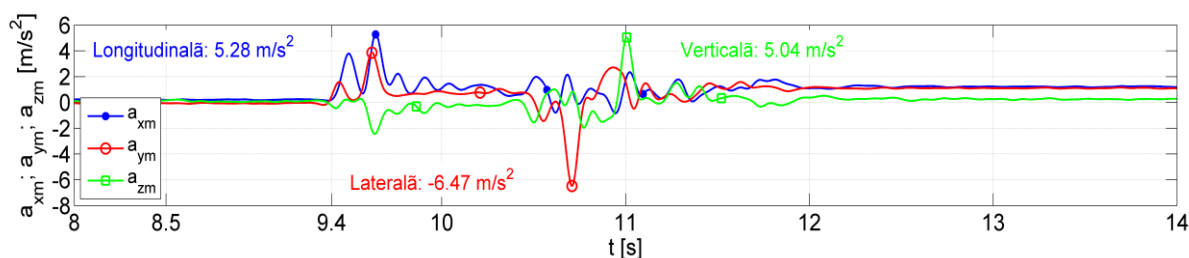


Figura 4.6. Diagrama de accelerații la nivelul toracelui manechinului pentru testul de coliziune nr. 1

4.2.2. Prelucrarea statistică a datelor experimentale

Pentru a compara cele două teste efectuate, în continuare se prezintă principalii indicatori statistici folosiți în literatura de specialitate.

În figura 4.7 se prezintă corelarea rezultatelor obținute la testul nr. 1, în ceea ce privește mărimile aferente autoturismului și toracelui manechinului.

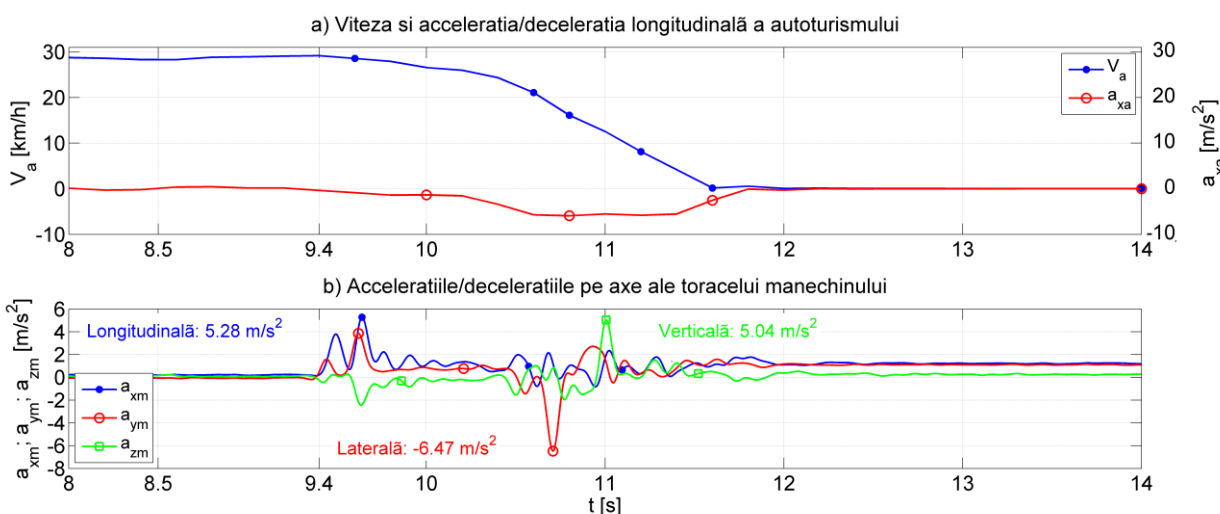


Figura 4.7. Testul de coliziune nr. 1: viteza și accelerația/decelerația longitudinală a autoturismului, accelerațiile/decelerațiile pe axe ale toracelui manechinului

În figura 4.8 se prezintă corelarea rezultatelor obținute la testul nr. 1, în ceea ce privește mărimile corespunzătoare autoturismului și capului manechinului.

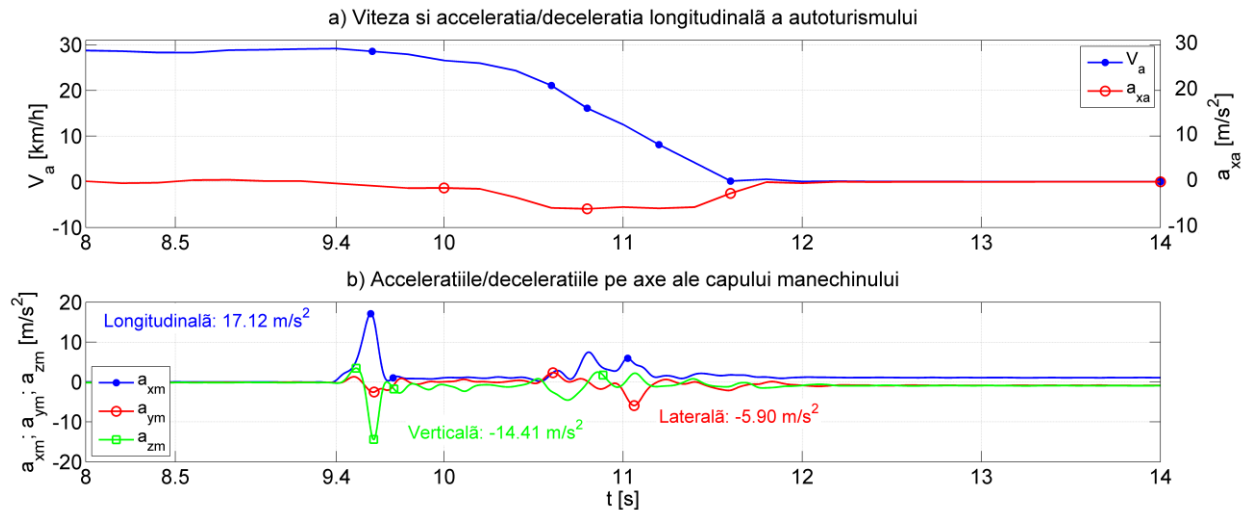


Figura 4.8. Testul de coliziune nr. 1: viteza și accelerația/decelerația longitudinală a autoturismului, accelerațiile/decelerațiile pe axe ale capului manechinului

În figura 4.9 și în figura 4.10 se prezintă corelarea rezultatelor obținute la testul nr. 2, în figura 4.9 fiind ilustrate mărimile aferente autoturismului și toraxului manechinului, iar în figura 4.10 cele corespunzătoare autoturismului și capului manechinului.

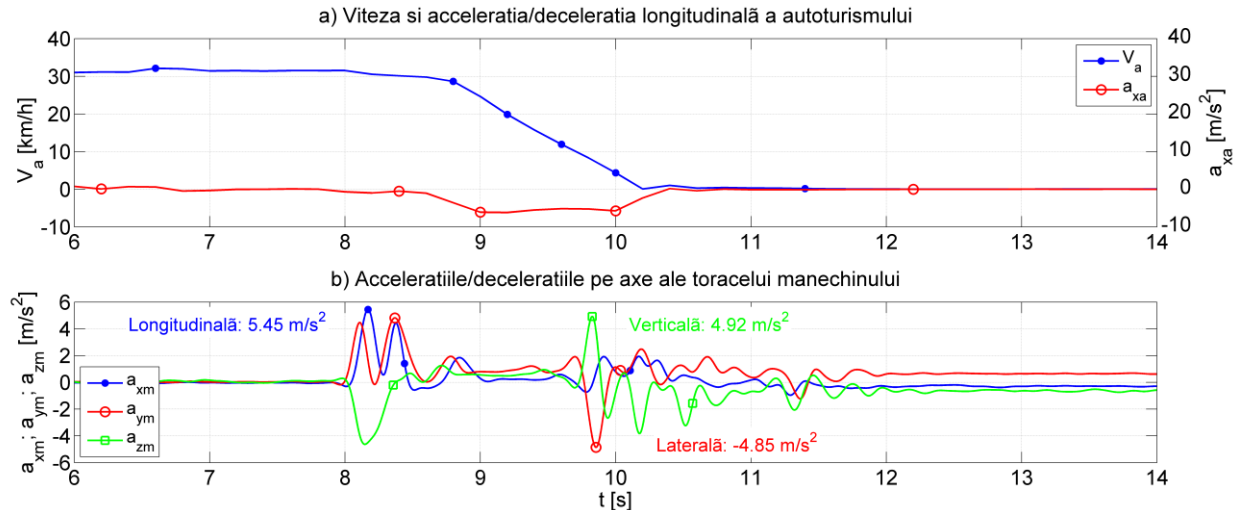


Figura 4.9. Testul de coliziune nr. 2: viteza și accelerația/decelerația longitudinală a autoturismului, accelerațiile/decelerațiile pe axe ale toraxului manechinului

Așa cum se poate constata, în graficele inferioare din figurile 4.7- 4.10 sunt prezentate și valorile extreme (maxime sau minime) ale accelerațiilor/decelerațiilor toraxului și capului manechinului.

Pe baza graficelor din figurile 4.7 - 4.10, în figura 4.11 se prezintă valorile maxime și medii ale vitezei autoturismului, precum și valorile maxime ale accelerației și decelerației acestuia.

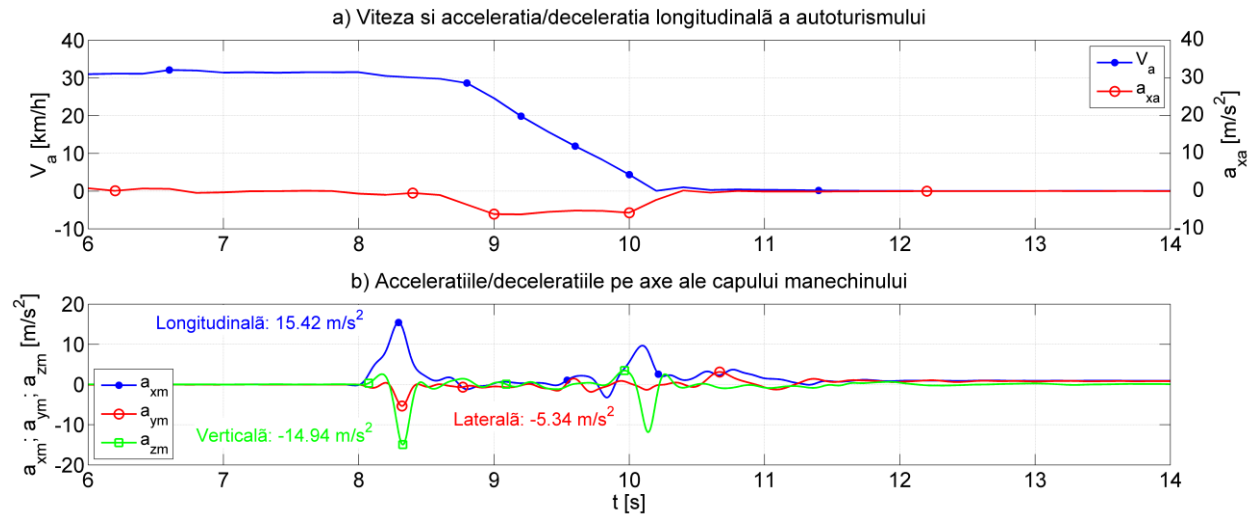


Figura 4.10. Testul de coliziune nr. 2: viteza și accelerația/decelerația longitudinală a autoturismului, accelerațiile/decelerațiile pe axe ale capului manechinului

După cum se constată din figura 4.11, la testul nr. 2 viteza maximă a avut valoarea cea mai mare din cele două teste, dar viteza medie la testul nr. 1 a fost cea mai ridicată. Cea mai mare accelerație a autoturismului a fost la testul nr. 1, iar decelerația cea mai ridicată a autoturismului s-a înregistrat la testul nr. 2.

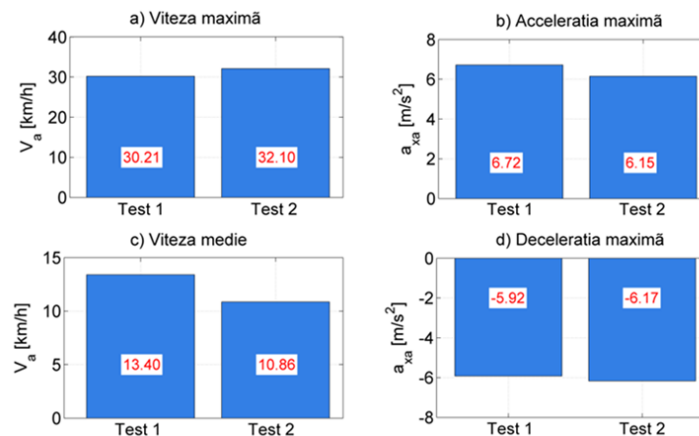


Figura 4.11. Valorile maxime și medii ale vitezei, valorile maxime ale accelerației și decelerației longitudinale a autoturismului

În figura 4.12 se prezintă accelerațiile maxime pe cele trei axe de coordonate (Ox, Oy și Oz) ale toracelui și capului manechinului.

Similar, în figura 4.13 sunt redată decelerațiile maxime pe cele trei axe de coordonate ale toracelui și capului manechinului.

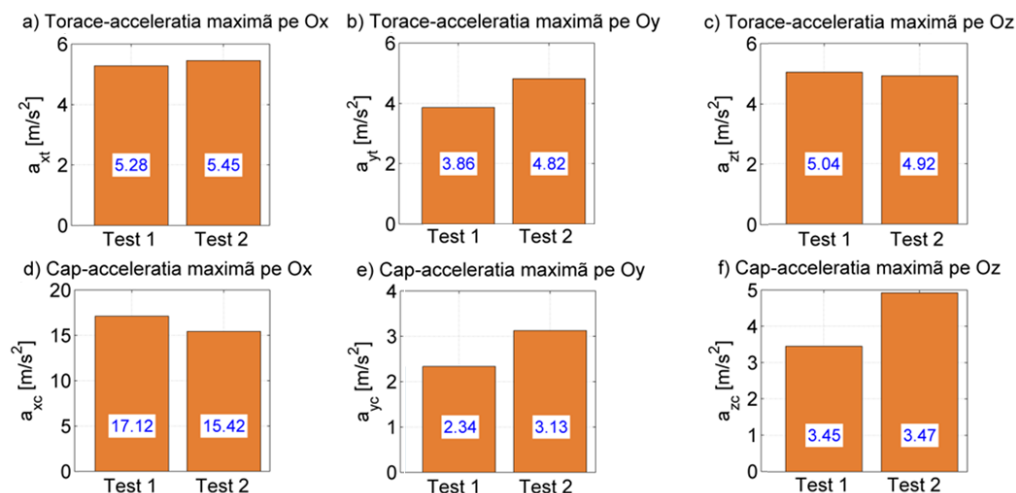


Figura 4.12. Valorile maxime pe cele trei axe de coordonate ale accelerației toracelui și capului manechinului

Din figura 4.12 rezultă că cele mai mari accelerații există la cap și anume cele de pe direcția longitudinală Ox, iar cele mai reduse sunt tot la nivelul capului, dar pe direcție laterală Oy. De asemenea, se constată că la torace accelerațiile prezintă valori apropiate pe cele trei axe de coordonate.

Graficele din figura 4.13 arată că cele mai mari decelerații se înregistrează la nivelul capului și anume pe direcția verticală Oz.

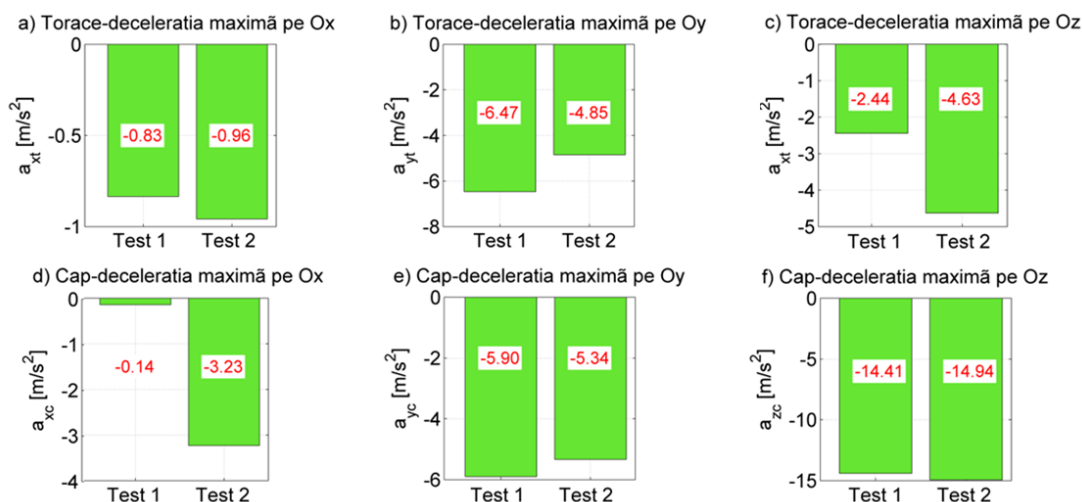


Figura 4.13. Valorile maxime pe cele trei axe de coordonate ale decelerației toracelui și capului manechinului

În figura 4.14 se prezintă dependența dintre valorile medii ale accelerațiilor sau decelerațiilor capului și toracelui pe cele trei axe de coordonate.

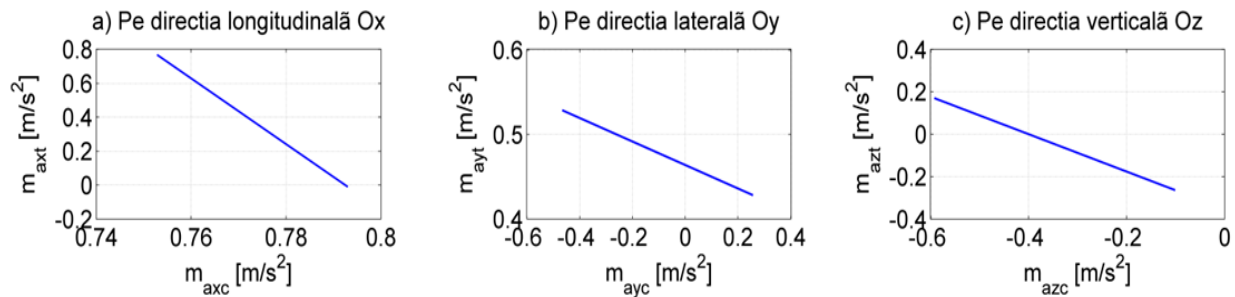


Figura 4.14. Dependența dintre valorile medii pe cele trei axe ale accelerației/decelerației capului și toracelui manechinului

Graficul relevă o dependență indirectă interesantă. Se poate constata că valorile medii ale accelerațiilor/decelerațiilor capului manechinului (m_{axc} , m_{ayc} , m_{azc}) scad cu creșterea valorilor medii ale accelerațiilor/decelerațiilor toracelui (m_{axt} , m_{ayt} , m_{azt}) și invers. Acest aspect se poate explica prin faptul că efectul de amortizare al gâtului se amplifică odată cu mărirea accelerațiilor/decelerațiilor (așa-numita "amortizare hard").

Capitolul 5

Modele matematice aferente accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton

5.1. Aspecte generale

Așa cum s-a prezentat anterior, din mulțimea de relații matematice existente în literatura de specialitate, care oferă valorile distanței de proiectare a pietonului în funcție de diferiți factori de influență, niciuna **nu verifică ambele accidente** rutiere reale analizate.

Din acest motiv, în continuare se urmărește stabilirea unui model matematic generalizat, care să ofere valorile distanței de proiectare a pietonului S_p la impactul acestuia cu autovehiculul, în funcție de diferiți factori de influență. În acest scop au fost vizati cinci factori de influență: viteza de deplasare a autovehiculului V , masa autovehiculului m_a , coeficientul de aderență autovehicul-sol φ , coeficientul de frecare pieton-sol μ și indicele masei corporale i_{mc} , ultimul fiind stabilit cu relația:

$$i_{mc} = \frac{m_p}{h_p^2} \quad (5.1)$$

Din expresia (5.1) se constată că indicele masei corporale crește odată cu mărirea masei pietonului și cu micșorarea înălțimii acestuia.

Datele necesare calculului au fost obținute pe baza reconstrucției celor două accidente investigate experimental și prezentate anterior. În acest scop au fost vizati cinci factori de influență, cărora li s-au variat valorile în intervalele prezentate în figura 5.1 ce corespund unor valori cele mai întâlnite în practică.

În graficele din figura 5.1 sunt redată și valorile minime și maxime ale celor șase mărimi vizate. De asemenea, în figura 5.1 și în graficele ulterioare sunt prezentate și valorile aferente celor două accidente reale, ce au fost analizate prin reconstrucție computerizată cu ajutorul programului PC-Crash 10.1, specializat în acest sens.

Metodologia de stabilire a modelului matematic final include deducerea în prealabil a unui model matematic căruia i se aplică analiza de sensibilitate în vederea stabilirii celor mai importanți factori de influență (și eliminarea celorlalți) și aplicarea analizei intervalelor pentru stabilirea modelului vizat.

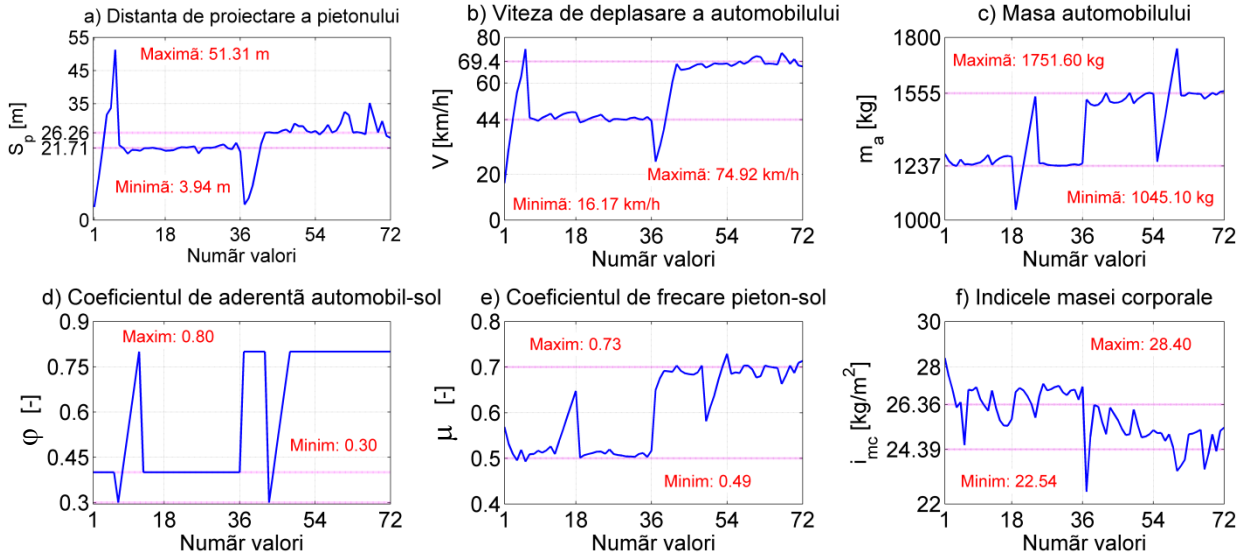


Figura 5.1. Intervalele de variație ale mărimilor caracteristice impactului autovehicul-pieton și valorile parametrilor corespunzători accidentelor analizate

Folosind valorile medii ale datelor din figura 5.1 se stabilește modelul matematic redat în figura 5.2 pentru unul din accidente analizate anterior, care are forma $S_p = f(V, m_a, \phi, \mu, i_{mc})$.

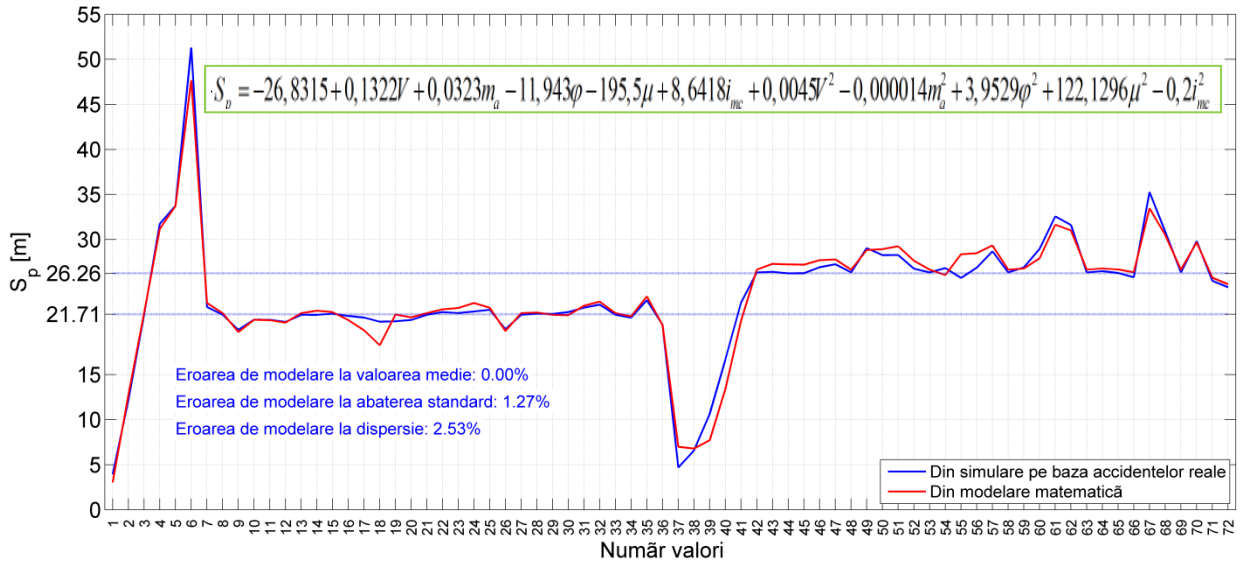


Figura 5.2. Impactul de tip autovehicul-pieton; modelare matematică ce are forma $S_p = f(V, m_a, \phi, \mu, i_{mc})$

În grafic sunt prezentate curba obținută prin simulare, curba rezultată prin modelare și expresia analitică a modelului matematic:

$$S_p = -26,8315 + 0,1322V + 0,0323m_a - 11,943\varphi - 195,5\mu + 8,6418i_{mc} + \dots \\ + 0,0045V^2 - 0,000014m_a^2 + 3,9529\varphi^2 + 122,1296\mu^2 - 0,2i_{mc}^2 \quad (5.2)$$

De asemenea, în grafic sunt redată și erorile obținute prin modelare; deoarece aceste valori sunt sub 4%, o limită frecvent folosită, rezultă că modelul matematic (5.2) asigură o precizie bună pentru accidentul vizat.

Prezintă interes să se studieze dacă expresia modelului matematic (5.2) mai poate fi simplificată, cu condiția obținerii unei precizii acceptabile, evident posibil doar prin micșorarea numărului termenilor, adică prin neglijarea unuia sau a mai multor factori de influență dintre cei cinci vizați. În acest scop trebuie apelat la analiza de sensibilitate, care oferă posibilitatea depistării factorilor cu influențe reduse și care pot fi neglijăți.

5.2. Analiza de sensibilitate

În cazul general, sensibilitatea exprimă proprietatea unei mărimi rezultative (numită și variabilă dependentă) de a-și modifica valoarea sub influența variabilei factoriale (numită și variabilă cauzală, sau variabilă independentă).

Sensibilitatea constituie o funcție care poate fi variabilă (caz în care există o heterosensibilitate) sau poate fi constantă (isosensibilitate). După sensul legăturii dintre variabila rezultativă și cea factorială, sensibilitatea poate fi directă sau inversă.

Din cele prezentate rezultă că analiza de sensibilitate permite inclusiv studiul influenței diferiților factori (mărimi factoriale) asupra unor mărimi rezultative.

Pentru abordarea sensibilității, se consideră o variabilă rezultativă oarecare y și o mărime factorială x . Gradul de sensibilitate a variabilei rezultative în funcție de variația mărimii factoriale este măsurat cu ajutorul funcției de sensibilitate S , definită prin raportul dintre variația relativă a mărimii rezultative și variația relativă a variabilei factoriale, în cazul considerat:

$$S_x^y = \frac{dy}{y} : \frac{dx}{x} \quad (5.3)$$

care arată că sensibilitatea funcției $y=f(x)$ este egală cu rata variației relative a mărimii rezultative y care revine pe o unitate de variație relativă a mărimii factoriale x . Așadar, funcția de sensibilitate arată cu câte procente se modifică mărimea rezultativă, atunci când mărimea factorială variază cu 1%.

Din relația (5.3) rezultă că sensibilitatea este independentă de unitățile de măsură ale variabilelor x și y (funcția de sensibilitate este adimensională); această expresie se poate scrie sub forma:

$$S_x^y = \frac{dy}{dx} : \frac{y}{x} \quad (5.4)$$

De aici rezultă a doua definiție a funcției de sensibilitate: sensibilitatea funcției y în raport cu variabila x este egală cu raportul dintre valoarea marginală a funcției și valoarea medie a acesteia.

De asemenea, expresia (5.3) se poate scrie sub forma:

$$S_x^y = \frac{x}{y} \frac{dy}{dx} \quad (5.5)$$

Considerând dy și dx ca diferențiale:

$$\int \frac{1}{y} dy = \lg y; \int \frac{1}{x} dx = \lg x \quad (5.6)$$

rezultă:

$$\int \frac{dy}{y} d(\lg y); \int \frac{dx}{x} d(\lg x) \quad (5.7)$$

și atunci (5.5) devine:

$$S_x^y = \frac{d(\lg y)}{d(\lg x)} \quad (5.8)$$

Din relația (5.8) se poate deduce a treia definiție a funcției de sensibilitate: sensibilitatea funcției y în raport cu variabila x este egală cu raportul dintre derivata logaritmică a lui y și derivata logaritmică a lui x . De aici rezultă o proprietate importantă a sensibilității: sensibilitatea unei funcții într-un punct oarecare al curbei $y=f(x)$ este dată de panta tangentei la curbă în punctul respectiv, atunci când y și x se reprezintă grafic la scări logaritmice.

Așadar, dacă de exemplu, se dorește stabilirea influenței vitezei automobilului V asupra distanței de proiectare a pietonului S_p , atunci se determină funcția de sensibilitate:

$$S_V^{S_p} = \frac{V}{S_p} \frac{\partial S_p}{\partial V} \quad (5.9)$$

în care mărimile V și S_p sunt cele din figura 5.1.a și figura 5.1.b, iar derivata parțială rezultă din expresia analitică (5.2) a modelului matematic.

Se obțin astfel rezultatele din figura 5.3, ce conține valorile instantanee ale funcției de sensibilitate.

După cum se constată din aceste grafice există o heterosensibilitate (toate funcțiile variază, nu sunt constante).

De asemenea, toate valorile sunt nenule, deci toți cei cinci factori influențează distanța de proiectare a pietonului. În plus, unele funcții sunt preponderent pozitive (deci legătura este directă), iar altele preponderent negative (legătură inversă).

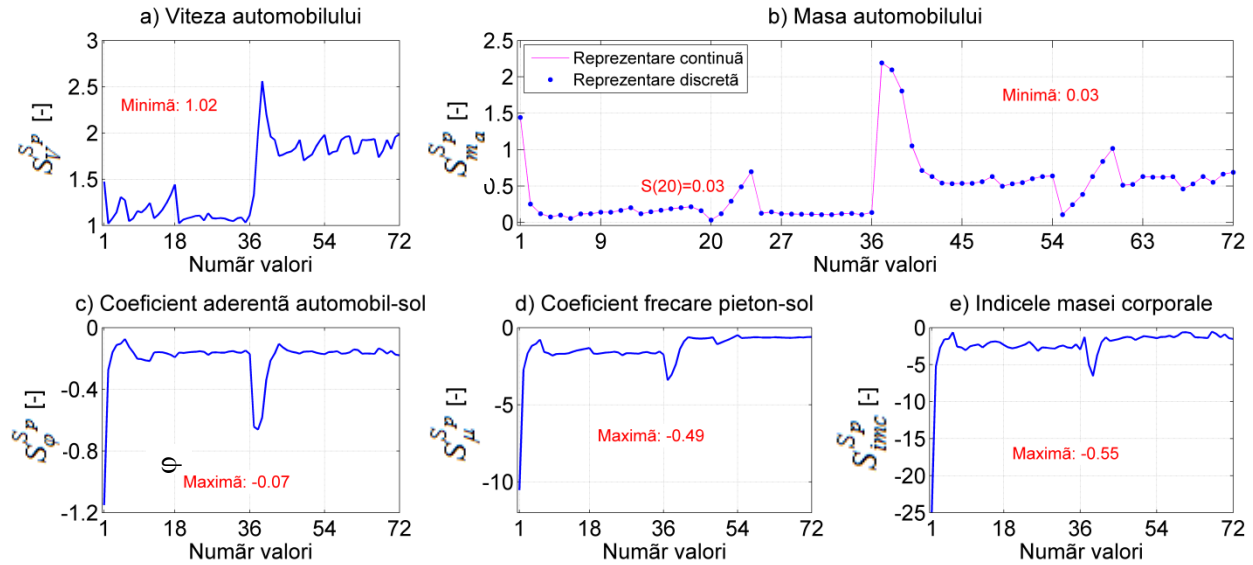


Figura 5.3. Valorile instantanee ale funcției de sensibilitate a distanței de proiectare a pietonului în raport cu cei cinci factori de influență

Pentru a aprecia pe ansamblu sensibilitatea distanței de proiectare la variația celor cinci factori de influență, în figura 5.4 se prezintă valorile medii S_m ale funcțiilor de sensibilitate.

După cum se constată din grafic, cea mai mare influență asupra distanței de proiectare a pietonului o are indicele masei corporale ($S_m = -2,36$), iar cea mai redusă coeficientul de aderență autovehicul-sol ($S_m = -0,2$).

De asemenea, din figura 5.4 rezultă că viteza și masa autovehiculului sunt în legătură directă cu distanța de proiectare, funcțiile de sensibilitate fiind pozitive. Acest aspect este evident, cu creșterea vitezei și masei autovehiculului, distanța de proiectare se mărește prin transferul energetic mai mare către pieton.

În schimb, din grafic rezultă că indicele masei corporale, coeficientul de aderență și coeficientul de frecare sunt în legătură inversă cu distanța de proiectare, funcțiile de sensibilitate fiind negative. Și acest aspect este evident, de exemplu cu creșterea coeficientului de frecare pieton-sol, distanța de proiectare se micșorează datorită pierderilor energetice mai mari care apar prin frecare.

Conform celor prezentate în figura 5.4, rezultă că se impune verificată posibilitatea neglijării coeficientului de aderență autovehicul-sol și eventual masei automobilului pentru stabilirea unui model matematic de tipul (5.2) simplificat.

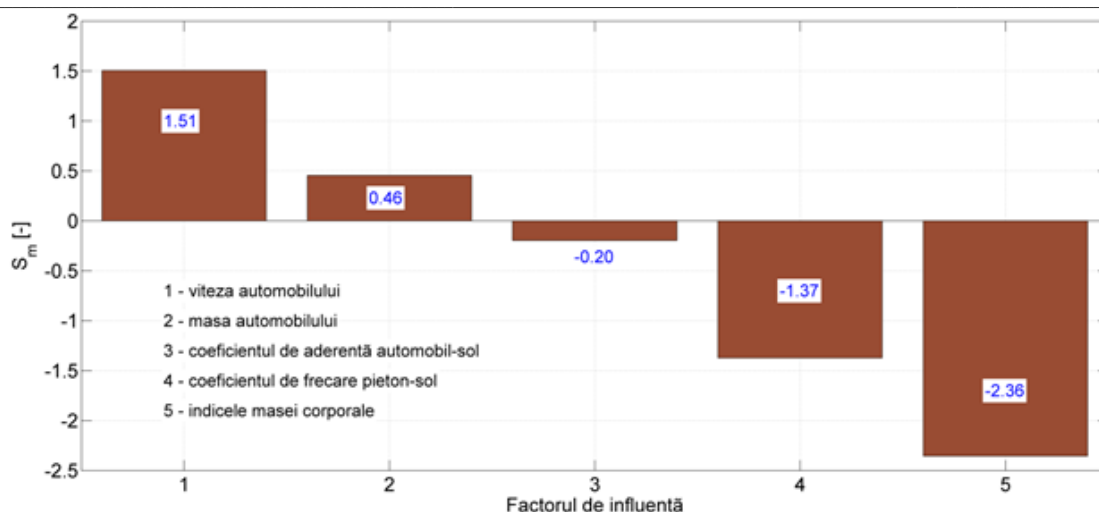


Figura 5.4 Valorile medii ale funcției de sensibilitate a distanței de proiectare a pietonului în raport cu cei cinci factori de influență

5.3. Model matematic determinist

În toate domeniile tehnice, pentru studiul teoretic al unui sistem/proces oarecare se stabilește modelul matematic, aplicând principii și legi cunoscute, algoritmi ce descrie sistemul/procesul în condițiile existenței unor perturbații impuse sau apreciate de specialist. La stabilirea modelului matematic se adoptă ipoteze simplificatoare și se fac aproximații asupra parametrilor sistemului analizat. Ipotezele adoptate și aproximațiile efectuate conduc la descrieri matematice incomplete, ce se depărtează de realitatea comportării sistemului vizat. Din aceste motive, în mod frecvent stabilirea modelului matematic se prefigurează teoretic și se definitivează pe baza datelor experimentale.

Prin urmare, este foarte important să se cunoască algoritmul de descriere matematică al sistemului/procesului vizat, ca forma de exprimare cea mai sintetică a acestuia, care să poată fi utilizat la diferite abordări teoretice, cu confirmare prin cercetările experimentale ce nu pot fi în volum oricât de mare. Rezultă în mod implicit că stabilirea modelului matematic pe baza datelor experimentale constituie singura posibilitate de a valida valorile care se adoptă teoretic. De asemenea, prin experimentări se poate stabili și dacă forma adoptată pentru modelul matematic (structura acestuia) este cea mai indicată.

Așadar, problema principală în studiul dinamic al oricărui sistem/proces o constituie stabilirea modelului matematic pe baza datelor experimentale; cu această problemă se ocupă identificarea sistemelor/proceselor. Problema identificării sistemelor/proceselor se poate formula în două moduri:

- identificarea parametrilor, adică evaluarea acestora în cazul în care se știe principal expresia analitică a modelului matematic, dar nu se cunosc valorile coeficienților care intervin;

- identificarea totală sau globală, în situația în care se cunoaște foarte puțin (există mari incertitudini) sau informația apriorică este insuficientă pentru a permite o reprezentare matematică adecvată; în acest caz identificarea are ca obiect atât deducerea celei mai reprezentative descrieri analitice pentru un sistem/proces, cât și stabilirea valorilor coeficienților care intervin. Trebuie menționat că valorile coeficienților sunt determinate inclusiv de parametrii constructivi ai sistemului/procesului respectiv.

Procedeele de identificare a sistemelor/proceselor sunt numeroase; dintre acestea, cele mai importante se referă la:

- identificarea continuă sau discretă. În prima situație mărimile au o evoluție continuă în timp, iar în a doua au o evoluție discretă; rezultatele identificării vor fi modele continue, respectiv discrete.

- identificarea folosind un model liniar sau unul neliniar. În primul caz evoluția în timp a ieșirilor sistemului în funcție de intrările sale poate fi reprezentată printr-un sistem liniar de ecuații diferențiale; în al doilea caz sistemul de descriere matematică este neliniar.

- identificarea parametrică sau neparametrică. În primul caz rezultatul identificării îl constituie un model parametric, descris prin ecuații diferențiale, ecuații cu diferențe, ecuații cu derivate parțiale, funcții de transfer etc.; rezultatul identificării neparametrice este un model reprezentat prin curbe, tabele cu valori, caracteristici de frecvență etc.

- identificarea deterministă sau stocastică. În prima situație reprezentarea sistemului/procesului este în domeniul determinist, deci toate mărimile au valori unice; în a doua situație reprezentarea sistemului/procesului apelează la intervale de valori.

- identificarea în domeniul timpului, în domeniul frecvenței sau în domeniul timp-frecvență. În prima situație se obțin descrieri matematice prin ecuații diferențiale, ecuații cu diferențe etc.; în al doilea caz se obțin caracteristici de frecvență, iar în al treilea rezultă caracteristici de timp-frecvență.

- identificarea teoretică, experimentală sau combinată. La ora actuală în mod frecvent se utilizează identificarea combinată a sistemelor/proceselor, caz în care cea teoretică furnizează informații apriorice procedurii de identificare experimentală. Ca urmare, identificarea sistemelor/proceselor trebuie să asigure o coincidență cât mai bună a mărimii de ieșire obținută prin modelare (mărimă estimată) cu valorile experimentale ale acesteia (mărimă măsurată).

În literatura de specialitate din domeniul autovehiculelor există mai multe tipuri de modele matematice analitice, cele mai frecvent utilizate și principalele fiind următoarele:

- modele deterministe și modele de tip interval. În primul caz mărimile cu care se operează și coeficienții modelului au valori unice, iar în al doilea caz au valori cuprinse în anumite intervale. În literatura de specialitate se folosesc în

special modele deterministe, care au însă marele dezavantaj că nu operează cu incertitudini ale mărimilor (cazul real), ce presupune apelarea la intervale.

- modele discrete și modele continui. În primul caz se folosesc modele de tip ecuații cu diferențe, regresii, polinomiale, exponențiale etc, iar în al doilea caz ecuații diferențiale.

- modele liniare și modele neliniare. În primul caz expresia analitică a modelului conține numai termeni liniari, iar în al doilea caz are și termeni neliniari (pătrate, radicali, exponențiale, produse de doi sau mai mulți factori etc.).

În sensul celor menționate anterior, în figura 5.5 se prezintă stabilirea unui model matematic de forma $S_p = f(V, m_a, \mu, i_{mc})$, deci prin neglijarea coeficientului de aderență φ .

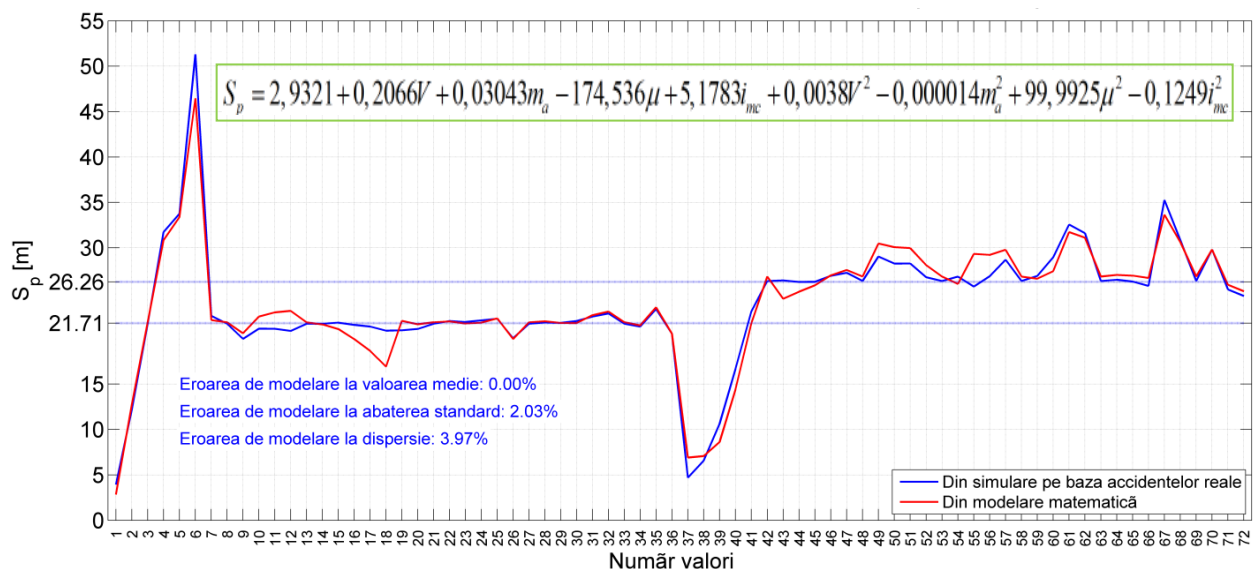


Figura 5.5. Modelarea matematică a distanței de proiectare a pietonului: $S_p = f(V, m_a, \mu, i_{mc})$

Similar, în figura 5.6 se redă stabilirea unui model matematic de forma $S_p = f(V, \mu, i_{mc})$, deci prin neglijarea masei autovehiculului m_a și coeficientului de aderență φ .

După cum se constată din figura 5.6, nu se poate utiliza un model matematic de forma $S_p = f(V, \mu, i_{mc})$, eroarea la dispersie fiind de aproape 5%.

În schimb, din figura 5.5 se constată că se poate utiliza un model matematic de forma $S_p = f(V, m_a, \mu, i_{mc})$, deci prin neglijarea coeficientului de aderență φ .

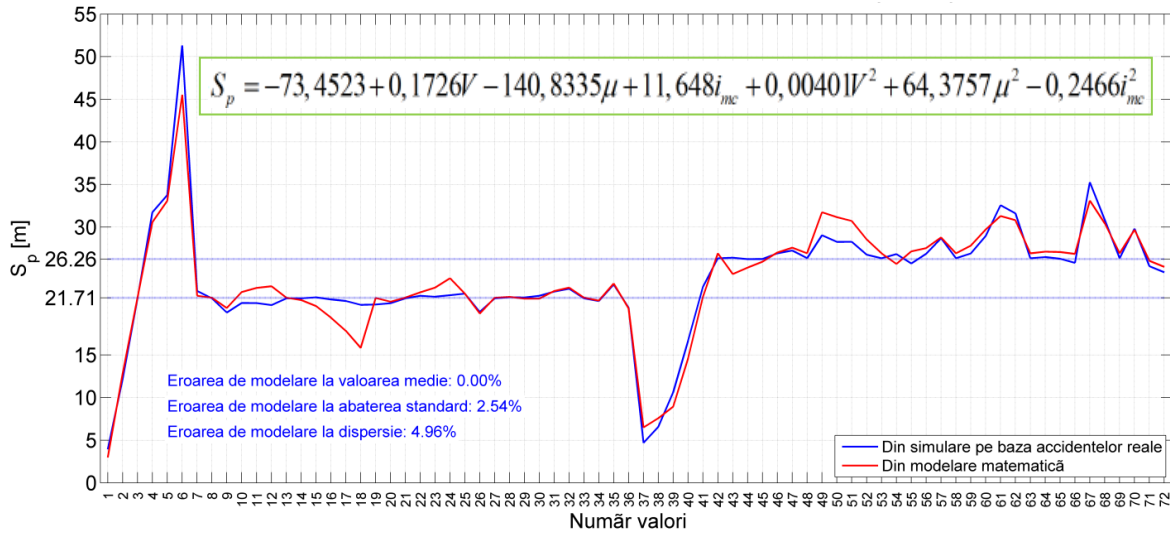


Figura 5.6. Modelarea matematică a distanței de proiectare a pietonului: $S_p = f(V, \mu, i_{mc})$

Modelul matematic de forma $S_p = f(V, m_a, \mu, i_{mc})$ are expresia analitică:

$$S_p = 2,9321 + 0,2066V + 0,0304m_a - 174,536\mu + 5,1783i_{mc} + \dots \quad (5.10)$$

$$+ 0,0038V^2 - 0,000014m_a^2 + 99,9925\mu^2 - 0,1249i_{mc}^2$$

pentru care toate erorile de modelare prezentate în grafic au valori reduse sub valoarea referențială, indicată în literatura de specialitate [43; 53], de 4%.

Aceasta fiind structura de bază a modelului matematic, în continuare se aplică conceptele și algoritmi analizei intervalelor pentru stabilirea modelului matematic vizat.

5.4. Elemente de analiza intervalelor

Practica a dovedit că în toate domeniile se întâlnesc intervale de valori, la care se apelează în diferite situații [19; 21; 42]. Adoptarea unor asemenea intervale are la origine imposibilitatea de a face previziuni deterministe, deci de a opera cu valori unice; așadar, apelarea la intervale de valori arată existența unor incertitudini asupra mărimilor cu care se operează. Cantitativ exprimat, incertitudinile pot fi definite drept *un set de valori la care ne putem aștepta*.

Spre exemplu, pentru o cale de rulare din beton, aflată în stare uscată, programul PC-Crash indică adoptarea unui coeficient de aderență în intervalul de valori $\varphi = 0,6 - 0,9$. Se poate scrie deci:

$$\varphi = 0,75 \pm 0,15 = 0,75 \left(1 \pm \frac{0,15}{0,75} \right) = 0,75 \left(1 \pm \frac{20}{100} \right) \quad (5.11)$$

Așadar, se consideră că la această cale de rulare coeficientul de aderență se poate adopta în calcule egal cu 0,75 (media intervalului) cu o incertitudine de 20%.

Se impune precizat că valorile prezentate în literatura de specialitate pentru coeficientul de aderență sunt obținute pe baza unor măsurători, evident anterioare. În cazul prezentat, dacă nu se realizează determinări experimentale, valoarea reală a coeficientului de aderență nu se cunoaște cu precizie și atunci se adoptă de regulă valoarea medie/nominală a celor prezentate în literatură. Corect ar fi însă să se efectueze calculele *cu tot intervalul de valori recomandat*, acest coeficient constituind o variabilă incertă; evident că și rezultatul obținut ar fi nu o valoare, ci un interval/plajă de valori.

După cum se constată din cele prezentate, un *interval de valori* se poate scrie sub forma, de exemplu pentru o mărime oarecare x [64; 65]:

$$x = [\underline{x}; \bar{x}] = \{x \in R | \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\} \quad (5.12)$$

Pentru un interval de valori $x = [\underline{x}; \bar{x}]$ se definesc:

- centrul/mijlocul intervalului:

$$m(x) = \frac{\underline{x} + \bar{x}}{2} \quad (5.13)$$

- raza intervalului:

$$r(x) = \frac{\bar{x} - \underline{x}}{2} \quad (5.14)$$

- amplitudinea/modulul intervalului:

$$A(x) = |x| = \max |x| = \max \{|\underline{x}|, |\bar{x}|\} \quad (5.15)$$

- lățimea intervalului:

$$w(x) = \bar{x} - \underline{x} = 2r(x) \quad (5.16)$$

Spre exemplu, pentru intervalul $x = [-3; 1]$ rezultă: $m(x) = -1$; $r(x) = 2$; $|x| = 3$; $w(x) = 4$.

Cu intervalele de valori se pot efectua operațiunile matematice cunoscute: adunarea, scăderea, înmulțirea, împărțirea, ridicarea la putere, extragerea radicalului etc.

De asemenea, intervalelor de valori li se pot aplica funcțiile matematice cunoscute: logaritmare, funcții exponențiale, funcții trigonometrice etc.

Astfel, *adunarea* a două intervale de valori $x = [\underline{x}; \bar{x}]$ și $y = [\underline{y}; \bar{y}]$ este dată de relația [63]:

$$x + y = [\underline{x} + \underline{y}; \bar{x} + \bar{y}] \quad (5.17)$$

Scăderea intervalelor x și y se efectuează conform expresiei:

$$x - y = [\underline{x} - \bar{y}; \bar{x} - \underline{y}] \quad (5.18)$$

Spre exemplu, dacă $x = [-2; 8]$ și $y = [4; 7]$, atunci rezultă:

$$x + y = [-2 + 4; 8 + 7] = [2; 15] \text{ și } x - y = [-2 - 7; 8 - 4] = [-9; 4].$$

Înmulțirea a două intervale este dată de relația:

$$x \cdot y = [\min(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}); \max(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y})] \quad (5.19)$$

Pentru exemplul anterior rezultă $x \cdot y = [-14; 56]$.

Împărțirea intervalelor x și y se efectuează conform expresiei:

$$\frac{x}{y} = x \cdot \frac{1}{y} = [\underline{x}; \bar{x}] \cdot \left[\frac{1}{\bar{y}}; \frac{1}{\underline{y}} \right], \text{ pentru } 0 \notin y \quad (5.20)$$

și deci se aplică relațiile (5.19) pentru mărimile x și $1/y$.

Pentru exemplul anterior rezultă $x / y = [-0,5; 2]$.

5.5. Model matematic de tip interval

Având structura de model (5.10) și ținând cont de intervalele de valori ale distanței de proiectare și factorilor de influență din figura 5.1, se obține un model matematic cu coeficienți situați în anumite intervale stabilite prin minimizarea erorilor de modelare. Se obține astfel modelul matematic de tip interval:

$$\begin{aligned} S_p = & \underbrace{[2; 4]}_{C_0} + \underbrace{[0,1; 0,3]}_{C_1} V + \underbrace{[0,03; 0,035]}_{C_2} m_a - \underbrace{[160; 175]}_{C_3} \mu + \underbrace{[5; 5,2]}_{C_4} i_{mc} + \dots \\ & + \underbrace{[0,0037; 0,0039]}_{C_5} V^2 - \underbrace{[0,000012; 0,000016]}_{C_6} m_a^2 + \dots \\ & + \underbrace{[99; 100]}_{C_7} \mu^2 - \underbrace{[0,12; 0,13]}_{C_8} i_{mc}^2 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Acest model matematic oferă valorile distanței de proiectare a pietonului S_p în funcție de cei patru factori de influență considerați. În relația (5.21) au fost notați coeficienții care se regăsesc pe axa absciselor în figura 5.7.

După cum se constată din relația (5.21), există un model matematic cu coeficienții notați $C_{(.)}$ și situați în intervalele prezentate în figura 5.7.

Pe ordonata graficelor sunt și valorile aferente celor două accidente reale analizate anterior: 21,71 m și 26,26 m; din relația (5.21) rezultă că S_p este situat în intervalul $S_p=[19,93;28,95]$ m care conține și cele două valori, deci modelul stabilit verifică și valorile accidentelor analizate.

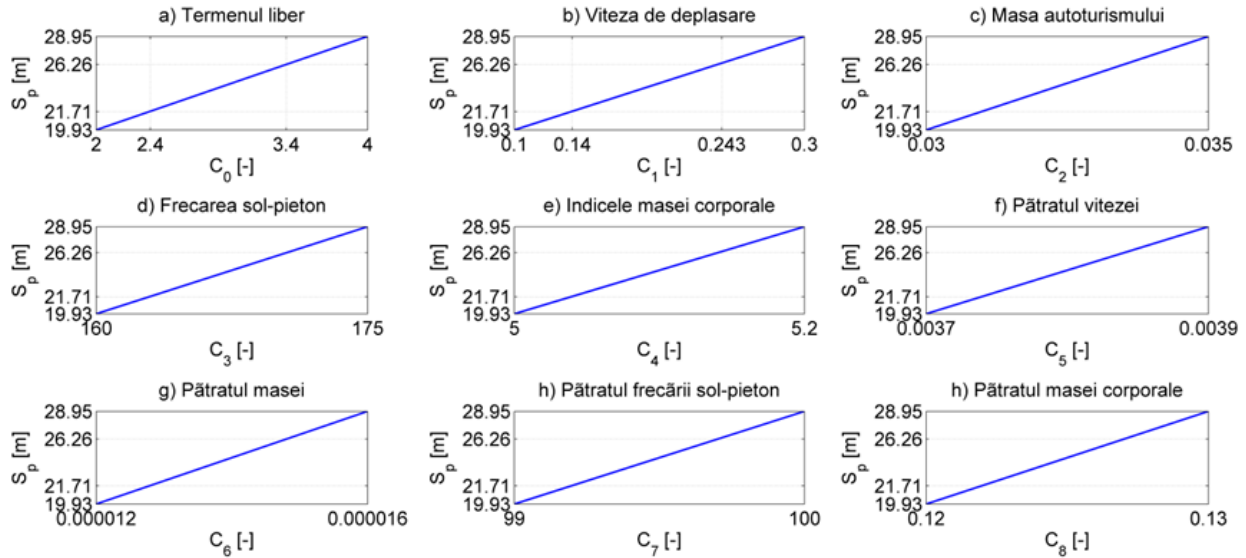


Figura 5.7. Distanța de proiectare a pietonului în funcție de coeficienții modelului matematic de tip interval

Din figura 5.7 se mai constată că pentru cele două valori S_p ale accidentelor analizate se pot stabili coeficienții aferenți. De exemplu, din figura 5.7.a rezultă că termenul liber are valoarea $C_0=2,4$ pentru primul accident și $C_0=3,4$ pentru al doilea accident.

Pentru a evalua modul cum influențează indicele masei corporale i_{mc} asupra distanței de proiectare S_p , se stabilește derivata parțială din expresia (5.21):

$$\frac{\partial S_p}{\partial i_{mc}} = \underbrace{[5;5,2]}_{C_4} - 2 \cdot \underbrace{[0,12;0,13]}_{C_8} i_{mc} \quad (5.22)$$

care are valorile redată în figura 5.8.

După cum se constată din figura 5.8, toate valorile derivatei sunt negative și deci cu creșterea indicelui masei corporale a pietonului scade distanța de proiectare a acestuia și invers, ceea ce validează concluzia dedusă la analiza de sensibilitate.

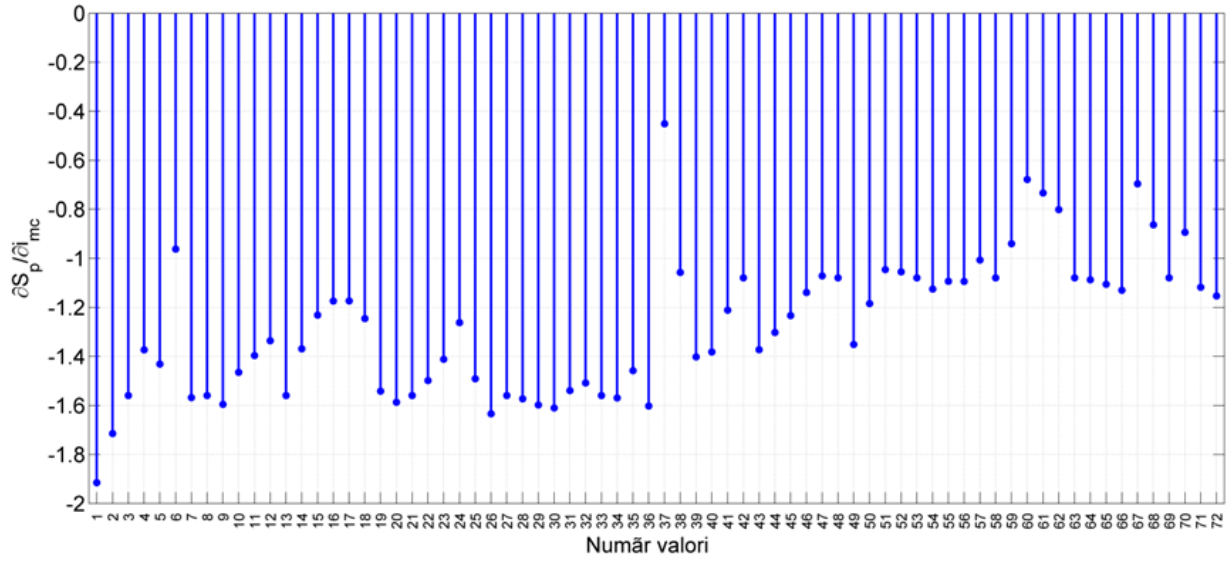


Figura 5.8. Derivata distanței de proiectare a pietonului în funcție de indicele masei corporale: $S_p = f(V, m_a, \mu, i_{mc})$

Mai trebuie menționat încă un avantaj al stabilirii modelelor matematice de tip interval, anume acela că se pot deduce expresii analitice simple, la care se pot adopta factori de influență ce interesează.

Întrucât unul din principalii parametri cinematici care prezintă interes este viteza de impact a autovehiculului, în vederea evaluării acestui parametru se va stabili un model matematic care să ofere valorile distanței de proiectare S_p , în funcție de viteza de impact V și de indicele masei corporale i_{mc} .

Aplicând analiza intervalelor se obține următorul model matematic de tip interval de forma:

$$S_p = a \cdot i_{mc}^b \cdot V^c \quad (5.23)$$

Considerând intervalul de valori pentru parametrul i_{mc} din figura 5.1.f, adică $i_{mc}=[22,54;28,40]$, precum și intervalul de valori pentru parametrul V din figura 5.1.b, adică $V=[16,17;74,92]$ și aplicând analiza intervalelor, se obțin valorile $a=[40; 100]$ $b=[-0,6; -0,5]$ și $c=[-0,01; 0,1]$.

Așadar, modelul matematic (5.23) devine:

$$S_p = [40;100] \cdot i_{mc}^{[-0,6;-0,5]} \cdot V^{[-0,01;0,1]} \quad (5.24)$$

Din acest model, pentru $V=[15; 75]$ km/h și $i_{mc}=[22; 28]$ rezultă:

$$S_p = [6,43; 29,1] \text{ m} \quad (5.25)$$

Modelul matematic verifică atât rezultatele obținute prin simulare, cât și pe cele din testările experimentale. De exemplu, în figura 5.9 se obțin valorile coeficienților a , b și c pentru testul de coliziune nr.2 la care distanța de proiectare a pietonului $S_p = 10,2$ m.

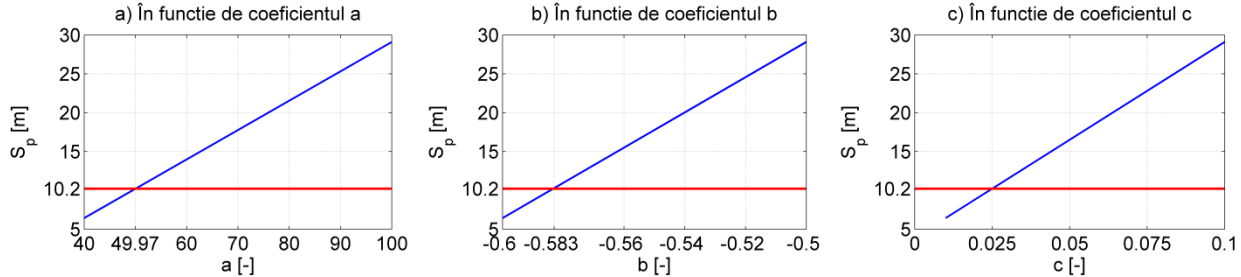


Figura 5.9. Variația spațiului de proiectare a pietonului în funcție de coeficienții modelului matematic de tip interval $S_p = f(V, i_{mc})$

După cum se observă din figura 5.9, orizontala $S_p = 10,2$ m intersectează graficul la valorile coeficienților din modelul (5.23): $a=49,97$; $b=-0,583$; $c=0,025$.

Introducând aceste valori în expresia (5.23) se obține:

$$S_p = 49,97 \cdot 25,66^{-0,583} \cdot 10,2^{0,025} = 8,2 \text{ m} \quad (5.26)$$

deci o diferență de 2,0 m.

În mod similar, dacă interesează numai indicele masei corporale a pietonului, atunci utilizând analiza intervalelor rezultă următorul model matematic de tip interval de forma:

$$S_p = a \cdot i_{mc}^b \quad (5.27)$$

Aplicând analiza intervalelor și considerând intervalul de valori pentru parametrul (i_{mc}) din figura 5.1.f, adică $i_{mc}=[22,54;28,40]$ se obțin valorile $a=[125; 150]$ și $b=[-0,6; -0,5]$.

Așadar, modelul matematic (5.27) devine:

$$S_p = [125;150] \cdot i_{mc}^{[-0,6;-0,5]} \quad (5.28)$$

care oferă intervalul de valori pentru $S_p=[19,3; 28,1]$ m.

Relația (5.27) arată că distanța de proiectare a pietonului scade odată cu creșterea indicelui masei corporale a acestuia și invers.

5.6. Concluzii

Pe baza elementelor prezentate în acest capitol se pot stabili următoarele concluzii:

- modelele matematice folosite în literatura de specialitate, care stabilesc valoarea distanței de proiectare a pietonului în funcție de diferiți factori de influență, nu verifică cazurile experimentale desfășurate de autor, de aceea în lucrare au fost stabilite alte modele în principal neliniare;

- modelele deterministe, frecvent folosite în literatura de specialitate, au marele dezavantaj că nu pot lua în considerare diversele incertitudini care există în mod real în practică. Așadar, aceste modele nu oferă posibilitatea operării cu intervale de valori ale mărimilor, caz în care expresiile analitice au coeficienți situați în anumite intervale;

- modelele de tip interval iau în considerare incertitudinile de natură diferită și de aceea oferă rezultate mai apropiate de realitate; totodată, aceste modele au un caracter general, ceea ce asigură garanția că verifică mai precis datele experimentale curente și viitoare;

- faptul că diversele probe experimentale au modele cu coeficienți diferiți confirmă caracterul nestăionar al fenomenelor aferente accidentelor rutiere;

- modelele liniare nu oferă totdeauna precizia de estimare dorită, de aceea e necesar să se utilizeze și modele neliniare pentru modelarea accidentelor de circulație;

- pentru stabilirea principalilor factori ce influențează desfășurarea unui accident de circulație trebuie apelat la analiza de sensibilitate, ceea ce asigură și stabilirea unui model matematic mai simplu.

Capitolul 6

Concluzii finale, contribuții principale și deschideri oferite de teza de doctorat

6.1. Concluzii

Studiile și cercetările teoretice și experimentale care au fost realizate pe parcursul elaborării tezei de doctorat, în vederea determinării posibilităților de stabilire a dinamicii accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton pe baza avariilor înregistrate la autovehicule, distanței de proiectare a pietonilor și gravității leziunilor acestora, au permis stabilirea unor concluzii referitoare la tema analizată în lucrare, de aceea în continuare se evidențiază următoarele concluzii generale:

1. Pe fondul procesului actual de urbanizare la nivel mondial, accidentele rutiere constituie evenimente cu implicații sociale și pierderi materiale importante, generând dezechilibre semnificative în societate, inclusiv prin cheltuielile cu persoanele vătămate care consumă mari fonduri din bugetele fiecărei națiuni.

2. Reconstrucția accidentelor rutiere, inclusiv a coliziunilor în care sunt implicați pietonii, în stadiul actual se realizează în mod retrospectiv pe baza datelor primare care sunt achiziționate prin cercetarea locului producerii accidentului, prin examinarea tehnică a autovehiculelor și pe baza evaluărilor medico-legale în ceea ce privește gradul de vătămare al persoanelor implicate.

3. În principal, reconstituirea accidentului de trafic de tip autovehicul - pieton reprezintă restabilirea, după o anumită perioadă de timp, a condițiilor în care s-a produs evenimentul care vizează starea de fapt, traiectoriile de deplasare și locul impactului, vitezele inițiale ale autovehiculelor, posibilitățile de evitare și cauzele producerii accidentului.

4. În timpul impactului dintre autovehicul și pieton, cinematica pietonului este complexă și depinde în special de configurația coliziunii.

5. În domeniul accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton, studii și cercetări experimentale cu privire la evaluarea vitezei autovehiculului în funcție de distanța de proiectare a pietonului au fost realizate încă din perioada anilor '70. Ulterior, apariția și dezvoltarea tehnicii de calcul, în mod deosebit a calculatoarelor electronice a contribuit esențial la dezvoltarea modelării fenomenelor neconservative care apar pe timpul derulării conflictelor rutiere, ceea ce a permis cu precădere în ultimele două decenii ca algoritmi și modele de calcul să devină tot mai complexe, fiind luat în considerație un număr mai mare de parametri caracteristici conflictului rutier.

6. Avînd în vedere că impactul dintre autovehicul și pieton reprezintă un fenomen complex, o modalitate adecvată de reconstrucție a parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentului analizat o reprezintă utilizarea metodelor analitice cu rezolvare numerică, prin simularea coliziunii autovehicul - pieton cu ajutorul programelor de specialitate (PC-Crash, Virtual Crash etc.), ce permit inclusiv vizualizarea tridimensională a pietonului pe toată perioada derulării simulării, pe baza sistemului multicorp.

7. Corelarea amplitudinii și poziționării avariilor autovehiculului cu tipul și localizarea leziunilor pietonului poate confirma sau infirma rezultatele cercetării retrospective a conflictului rutier.

8. Viteza de impact a autovehiculului poate fi evaluată pe baza amplitudinii avariilor autovehiculului, un element referențial în acest sens fiind reprezentat de configurația avariilor de la nivelul parbrizului.

9. Metodele actuale de cercetare pot evalua gradul de vătămare al corpului uman considerat în integralitate. Evaluarea parametrilor cinematici și dinamici pentru o anumită componentă ori organ predispus a fi afectat în cadrul manifestării unor reacții specifice tipului de solicitare și analiza comparativă în raport cu toleranța umană la solicitările produse de accidente rutiere, generează un nivel mai ridicat de fidelitate pentru reconstrucția accidentului, inclusiv în ceea ce privește modalitatea producerii vătămarilor pietonului.

10. Metodele de evaluare a parametrilor cinematici și dinamici, pe componente, par a reprezenta cele mai bune soluții pentru evaluarea potențialului de vătămare a pietonului rezultat în accident, atât în timpul impactului dintre autovehicul și victimă, cât și în timpul impactului pietonului cu solul.

11. Rezultatele obținute în urma analizei celor două accidente rutiere, care au fost filmate în timp real de către camere de supraveghere video, relevă faptul că în timpul impactului valori semnificative ale forțelor de contact și accelerațiilor s-au manifestat la nivelul toracelui și capului pietonului, acestea fiind superioare valorilor tolerate de corpul uman. Mărimea accelerațiilor și forțelor de contact, precum și durata impactului reprezintă principalii factori generatori ai gravității leziunilor suferite de victime. Impactul secundar, cu solul, s-a dovedit a fi un alt factor important în generarea de traume severe.

12. Leziunile pietonului provenite din accident pot fi rezultate exclusiv în impactul cu autovehiculul sau în unele situații pot fi generate vătămări suplimentare prin contactul pietonului cu mediul înconjurător.

13. Cercetarea experimentală s-a efectuat în condiții bune, conform scenariului stabilit, iar datele achiziționate au fost utile pentru validarea modelului matematic.

14. Din analiza parametrilor cinematici ce au fost înregistrați la nivelul toracelui și capului pietonului în cadrul testelor de coliziune se constată o dependență indirectă între valorile medii ale accelerațiilor/decelerațiilor capului

manechinului, care scad cu creșterea valorilor medii ale accelerațiilor/decelerațiilor toracelui și invers. Astfel putem afirma că efectul de amortizare al gâtului se amplifică odată cu mărirea accelerațiilor/decelerațiilor.

15. În studiul teoretic al dinamicii impactului de tip autovehicul - pieton există numeroase incertitudini de natură diferită, ceea ce determină ca element necesar operarea cu intervale de valori pentru parametrii care constituie astfel mărimi variabile.

16. În studiul dinamicii impactului incertitudinile care se regăsesc cel mai frecvent sunt cele parametrice, care sunt aferente modelelor matematice obținute pe baza datelor experimentale.

17. În ceea ce privește parametrii de interes, care influențează distanța de proiectare a pietonului, și anume viteza de deplasare a autovehiculului, masa autovehiculului, coeficientul de frecare autovehicul-sol, coeficientul de frecare pieton-sol și indicele masei corporale, analizând sensibilitatea distanței de proiectare la variația celor cinci factori de influență se constată că cea mai mare influență asupra distanței de proiectare a pietonului o are indicele masei corporale ($S_m = -2,36$), iar cea mai redusă coeficientul de frecare autovehicul-sol ($S_m = -0,2$).

18. Indicele de masă corporală fiind un parametru de sensibilitate maximă are o influență semnificativă în cadrul calculului efectiv al dinamicii impactului de tip autovehicul-pieton, astfel încât se impune a fi luat în considerare pentru determinarea parametrilor cinematici ai coliziunii autovehicul-pieton, care se urmăresc a fi stabiliți în cadrul lucrărilor de expertiză tehnică.

6.2. Contribuții principale

Activitățile de cercetare teoretică și experimentală efectuate pentru elaborarea lucrării evidențiază următoarele contribuții originale:

- Cercetarea coliziunii dintre autovehicul și pieton a fost abordată în cuprinsul lucrării într-o viziune nouă bazată pe corelația dintre distanța de proiectare a pietonului, viteza de impact a autovehiculului și indicele de masă corporală al pietonului.
- Utilizarea pentru prima dată în studiul cinematicii pietonului a unui factor de corelare între masa pietonului și înălțimea acestuia, materializat prin parametrul denumit indicele de masă corporală al pietonului (i_{mc}).
- Definirea indicelui de masă corporală al pietonului ca element de evaluare a vitezei de impact a autovehiculului, în condițiile în care este cunoscut spațiul de proiectare a pietonului.
- Studiile efectuate cu ocazia realizării lucrării au condus la propunerea utilizării parametrilor masa autovehiculului m_a , coeficientul de frecare pieton - sol μ și viteza de deplasare a autovehiculului la momentul

impactului V , alături de indicele masei corporale i_{mc} , drept factori de influență referențiali pentru evaluarea spațiului de proiectare a pietonului S_p .

- Dezvoltarea și validarea unui model matematic ce permite în condiții de incertitudine, determinarea distanței de proiectare a pietonului în funcție de principalii patru factori de influență menționați mai sus, în situația când autoturismul se află în regim de decelerare la momentul impactului.
- Prezentarea unui studiu asupra impactului dintre autovehicul și pieton prin utilizarea metodelor de reconstrucție computerizată a coliziunii comparativ cu metodele analitice.
- Analiza și reconstrucția accidentelor rutiere reale (filmate în timp real de către camere de supraveghere video) în care sunt implicați și pietoni, prin apelarea la biomecanica impactului și stabilirea valorilor parametrilor cinematici și dinamici caracteristici coliziunii de tip autovehicul - pieton.
- Prezentarea noțiunilor specifice privind biomecanica impactului, cu evidențierea cantitativă a toleranței organismului uman la producerea unor leziuni și cu prezentarea principalelor criterii utilizate în literatura de specialitate pentru evaluarea riscului de vătămare și severității leziunilor.
- Pentru reconstrucția accidentului rutier și analiza cinematicii traiectoriei postimpact a pietonului au fost utilizate programe specializate de simulare.
- Analiza statistică a unor seturi de date referitoare la teste de coliziune autovehicul - pieton a permis determinarea dependenței indirecte între valorile medii ale accelerațiilor/decelerațiilor capului manechinului și valorile medii ale accelerațiilor/decelerațiilor toracelui acestuia, ceea ce se poate explica prin faptul că efectul de amortizare al gâtului se amplifică odată cu mărirea accelerațiilor/decelerațiilor pietonului.
- Elaborarea unor sinteze privind:
 - stadiul la momentul actual al cercetărilor în domeniul reconstrucției parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton;
 - principalele modele de calcul din literatura de specialitate pentru evaluarea pe cale analitică a corelației dintre viteza de impact a autovehiculului și distanța de proiectare a pietonului;
 - analiza mecanismelor de impact dintre autovehicul și pieton în funcție de zona de contact cu autovehiculul.
- Cercetarea experimentală a fost efectuată prin realizarea unor scenarii de testare similare cu situațiile în care se produc accidente rutiere, din punct de vedere atât al coliziunii autovehiculului cât și din punct de vedere al comportamentului la impact al pietonului.

- În cadrul cercetării experimentale măsurarea vitezei autovehiculului și accelerațiilor la nivelul capului și toracelui pietonului s-a realizat prin utilizarea echipamentelor specifice, iar pentru prelucrarea datelor achiziționate cu ajutorul acestora au fost utilizate programe de calculator, metode și tehnici actuale.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

Concluziile și rezultatele care au fost obținute până în prezent și sunt evidențiate în lucrare asigură următoarele direcții de cercetare:

- perfecționarea modelului matematic elaborat, prin analiza impactului frontal în cazul coliziunilor cu pietoni cu înălțimea redusă (copii);
- conceperea unui set de metode de analiză a accidentelor rutiere de tip autovehicul - pieton, bazat pe combinarea metodelor analitice tradiționale de reconstituire a coliziunii cu metodele computerizate;
- studierea fenomenelor care apar în timpul contactului direct dintre autovehicul și pieton, cu scopul îmbunătățirii modelelor și metodelor de reconstituire a accidentelor rutiere de acest tip;
- în ceea ce privește metodele utilizate la studiul impactului dintre autovehicul și pieton, având în vedere tendințele din domeniul auto de implementare în circulația pe drumurile publice a vehiculelor autonome, o preocupare majoră va fi reprezentată în viitor de extinderea cercetării asupra acestor tehnici pentru reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici evenimentelor rutiere în care astfel de vehicule pot fi implicate.

Bibliografie selectivă

1. Aarestrup, J., Bjerregaard, L. G., Baker, J. L., *Tracking of body mass index from 7 to 69 years of age*, International Journal of Obesity, vol.40, p.1376–1383, 2016
9. Batista, M., *A Simple Throw Model For Frontal Vehicle Pedestrian Collisions*, Promet-Traffic&Transportation, nr.6, vol.20, p.357–689, 2008
10. Bețiu, G., *Procedura de stabilire a elementelor dinamicii accidentului în cazuistica impactului autovehicul-pieton*, Revista de criminologie, de criminalistică și de penologie nr.3, INEC, București, 2006
11. Bhalla, K., Montazemi, P., Crandall, J., Liu, X., Yang, J., Longhitano, D., *Vehicle Impact Velocity Prediction from Pedestrian Throw Distance: Trade-Offs between Throw formulae, Crash Simulators and Detailed Multi-Body Modeling*, International Research Council on the Biomechanics of Impact (IRCOBI), Conference Munchen, 2002
12. Bingkun, L., Honglei, M., Shizhong, J., Huiliang, D., *Simulation analysis of human neck injury risk under high-level landing impact*, International Journal of Crashworthiness, vol.14, issue 6, p.585-590, 2009
13. Brach, R., Brach, M., *Vehicle accident analysis and reconstruction methods*, SAE, Warrendale, USA, 2011
14. Burg, H., Moser A., *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion Unfallaufnahme*, Viewg&Teubner, Wiesbaden, Germany, 2009
15. Brooks, D. A., *A comprehensive review of pedestrian impact reconstruction*, SAE Technical Paper no.890859, 1989
16. Brooks, D. A., Wiechel, J. F., Collins, J. A., *Reconstruction of Real World Pedestrian Impact*, SAE Technical Paper no.860210
17. Burg, H., Moser A. *Handbook of accident reconstruction*, Viewg&Teubner, Kippenheim, Germany, 2013
18. Burke, M., *Forensic medical investigation of motor vehicle incidents*, Taylor&Francis, Boca Raton, USA, 2007
19. Castrup, H., *Estimating and Combining Uncertainties*, Integrated Sciences Group, Bakersfield, California, 2004
20. Catherine, M., Pierre-Jean, A., Christian, B., Dominique, C., *Pedestrian injury mechanisms & criteria a coupled experimental and finite element approach*, The 18th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), paper no.05-0335, Nagoya, Japan, 2005
21. Coleman, H., Steele, W., *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers*, John Wiley&Sons, 2nd Edition, 1999

-
22. Coley, G., de Lange, R., de Oliveira, P., Neal-Sturgess, C., Happee, R., Birmingham Automotive Safety Centre; *Pedestrian Human Body Validation Using Detailed Real-World Accidents* - IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact presentation, Praga, 2001
23. Copae, I., Lespezeanu, I., Cazacu, C., *Dinamica autovehiculelor*, Ed.ERICOM, București, 2006
24. Cordoș, N., Burnete, N., Todoruț, A., *Coliziunea automobilelor*, Ed.Todesco, Cluj-Napoca, 2003
25. Corpul Experților Tehnici din România, *Unele aspecte ale dinamicii accidentelor rutiere și evaluarea mijloacelor de transport auto*, Suport de curs, Brașov, 2001
26. Cristea, D., *Abordarea accidentelor rutiere, egarding the Motor Vehicle – Pedestrian Collision*, Ed. Universității din Pitești, Pitești, 2009
27. Cuerden, R., Richards, D., Hill, J., *Pedestrians and their survivability at different impact speeds*, Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Lyon, paper no.07-0440, 2007
29. David, C., Viano, A., King, J., *Injury Mechanisms and Biofidelity of Dummies*, NATO Advanced Study Institute, Troia, Portugal, 1996
30. Davis, G. A., *Relating severity of pedestrian injury to impact speed in vehicle pedestrian crashes*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board no.1773, p.108–113, 2001
31. Depriester, J. P., *Comparison of several methods for real pedestrian accident reconstruction*, Criminal Research Institute of the French National Gendarmerie, France, paper no.05-0333, 2005
32. Dettinger, J., *Methods of improving the reconstruction of pedestrian accidents: development differential, impact factor, longitudinal forward trajectory, position of glass splinters*, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1997
33. Diverse Populations Collaborative Group, *Weight-height relationships and body mass index: some observations from the Diverse Populations Collaboration*, American Journal of Physical Anthropology, vol.128, p.220–229, 2005
34. Eubanks, J. J., Haight, W., *Pedestrian Involved Traffic Collision Reconstruction Methodology*, SAE Technical Paper no.921591
35. Evans, A. K., Smith, R., *Vehicle speed calculation from pedestrian throw distance*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol.213, part.D, 2009
36. Fildes, B., Gabler, H.C., Otte, D., Linder, A., Sparke, L., *Pedestrian impact priorities using realworld crash data and harm*, Proceedings of the 2004 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact, Graz, 2004
37. Franck, H., Franck, D., *Mathematical methods for accident reconstruction*, Ed. CRC Press, Boca Raton, USA, 2013
-

-
38. Fugger, T., Randles, B., Wobrok, J., Eubanks, J., *Pedestrian Throw Kinematics in Forward Projection Collisions*, SAE Technical Paper no.2002-01-0019
39. Gaiginschi, R., Filip, I., *Expertiza tehnică a accidentelor rutiere*. Ed. Tehnică, București, 2002
40. Gaiginschi, R., Filip, I., *Reconstrucția și expertiza accidentelor rutiere*, Ed. Tehnică, București, 2009
41. Gardenes, E., *Modal Intervals*, Reliable Computing, no.7, pg.77-111, Kluwer Academic Publishers, 2001
42. Gioia, F., *Basic Statistical Methods for Interval Data*, Statistica Aplicata, vol.17, no.1, p.1-29, 2005
43. Grabe, M., *Measurement Uncertainties in Science and Technology*, Springer, 2nd Edition, 2014
44. Grandon, C., *Resolution de systemes d'equations de distance avec incertitudes*, These, Universite de Nice-Sophia, 2007
45. Guiman, V., *Contribuții la identificarea dinamică a mișcărilor corpului uman cu aplicații în sport*, teza de doctorat 2014
46. Halpern, J., *Reasoning about Uncertainty*, MIT Press, Cambridge, 2003
47. Han, I., Brach, R., *Throw Model for Frontal Pedestrian Collision*, SAE Technical Paper no.2001-01-0898
48. Hannawald, L., Kauer, F., *Equal Effectiveness Study on Pedestrian Protection*, Technische Universität Dresden, 2004
49. Hayashi, H., Inomata, R., Fujishiro, R., Ouchi, Y., Suzuki, K., Nanami, T., *Development of pre-crash safety system with pedestrian collision avoidance assist*, In Proceedings of the 23rd International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), paper no.13-0271, Seoul, Republic of Korea, 2013
50. Heinrichs, B., Lawrence, J., Allin, D., Bowler, J., Wilkinson, C., Ising, K., *Accident reconstruction: Crash analysis*, SP-1572, SAE, Warrendale, USA, 2001
51. Henn, H. W., *Crash Tests and the Head Injury Criterion*, Teaching Mathematics and its Applications, vol.17, no.4, p.162-170, 1998
52. Huston, L. R., *Principles of biomechanics*, Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009
53. Jaulin, L., *Applied Interval Analysis*, Springer-Verlag, London, 2001
63. Liu, B., *Uncertainty Theory: An Introduction to its Axiomatic Foundations*, Springer-Verlag, Berlin, 2004
64. Liu, B., *Uncertainty Theory*, Fourth Edition, Springer-Verlag, Berlin, 2015
65. Ljung, L., *From Data to Model: A Guide Tour of System Identification*. Linköping University, Sweden, 1995
66. MacKay, N. J., *Scaling of human body mass with height: The body mass index revisited*, Journal of Biomechanics, vol.43, p.764–766, 2010
-

-
71. Moser, A., Steffan, H., Kasanicky, G., *The Pedestrian Model in PC-Crash – The Introduction of a Multi Body System and its Validation*, SAE Technical Paper no.1999-01-0445, Accident Reconstruction: Technology and Animation IX
72. Moser, A., Hoschopf, H., Steffan, H., Kasanicky, G., *Validation of the PC-Crash Pedestrian Model*, SAE Technical Paper no.2000-01-0847
73. Muttart, J., W., *Accident Reconstruction*, SP-1773, SAE world congress Detroit, USA, 2003
74. Neades, J., *Developments in road vehicle crush analysis for forensic collision investigation*, Thesis, Montfort University, 2011
75. Pasanen, E., *Driving Speeds and Pedestrian Safety; A Mathematical Model*, Helsinki University of Technology, Transport Engineering, publication no.77, Otaniemi, Finland, 1992
78. Petrescu, L., Petrescu, Al., *Experimental research in case of car to pedestrian collision*, In AMMA 2018 International Congress of Automotive and Transport Engineering, Cluj-Napoca, 2018
79. Petrescu, L., Petrescu, Al., Stoica, R., Sava, D., Darie, C., *Elements regarding the dynamics of vehicle-pedestrian collision*, Asian Academic Research Journal of Science&Humanities, Volume 5, issue 2, february 2018, p.326-343
80. Petrescu, L., Petrescu, Al., *Vehicle-pedestrian collisions - Aspects regarding pedestrian kinematics, dynamics and biomechanics*, In CAR 2017 International Congress of Automotive and Transport Engineering, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 252 012001, 2017
81. Petrescu, L., *Cercetări experimentale și analiza comparativă a parametrilor cinematici și dinamici caracteristici unor conflicte rutiere de tip autovehicul-pieton filmate în timp real și, respectiv, simulați prin utilizarea programelor computerizate de tip Crash*, Raport de cercetare științifică nr.3, Universitatea din Pitești, Pitești, 2016
82. Petrescu, L., Petrescu, Al., *Comparative analysis of kinematics and dynamics parameters that characterize vehicle-pedestrian collision*, In Chiru, A., Ispas, N. (eds) CONAT 2016 International Congress of Automotive and Transport Engineering, Springer International Publishing, p.844-855, 2016
83. Petrescu, L., Petrescu, Al., Stoica, R., Radulescu, J., *Aspects regarding the reconstruction of car crashes involving pedestrians*, Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary, Volume 4, issue 4, april 2017, p.25-35
84. Petrescu, L., *Rezultate preliminare privind modelarea și simularea fenomenelor specifice impactului autovehicul-pieton*, Raport de cercetare științifică nr.2, Universitatea din Pitești, Pitești, 2015
85. Petrescu, L., *Stadiul actual al cercetărilor privind reconstrucția parametrilor cinematici și dinamici caracteristici accidentelor rutiere de tip autovehicul-pieton*, Raport de cercetare științifică nr.1, Universitatea din Pitești, Pitești, 2014
-

-
86. Pohlak, M., Majak, J., Eerme, M., *Optimization of car frontal protection system*, Int. J. Simulation Multidisciplinary Design Optim., 2007
87. Portal, R., Dias, J., *Multibody Models For Vehicle Accident Reconstruction*, ECCM – III European Conference on Computational Mechanics – Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Mota Soares et al. ed. Lisbon, Portugal, 2006
88. Portal, R., Dias, J., *Road Accident Reconstruction Based on Multibody Dynamics*, Multibody Dynamics 2007 - ECCOMAS Thematic Conference, Milan, 2007
89. Poțincu, Gh., Tabacu, I., Hara, V., *Automobile*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1980
90. Prentice, A., Jebb, S., *Beyond body mass index*, Obesity Reviews, vol.2, p.141-147, 2001
91. Rau, H., Otte, D., *Car to pedestrian collisions with high speed impact*, Journal Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2001
92. Rau, H., Otte, D., Schulz, B., *Pkw-Fußgängerkollisionen im hohen Geschwindigkeitsbereich Ergebnisse von Dummyversuchen mit Kollisionsgeschwindigkeiten zwischen 70 and 90 km/h*, Das Fachmagazin für Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 12, p.341-350, 2000
93. Ravani, B., Brougham, D., Mason, R. T., *Pedestrian Post-Impact Kinematics and Injury Patterns*, SAE Technical Paper no.811024, 1981
94. Romero-Corral, A., Somers, V., Sierra-Johnson, J., Thomas, R., Collazo-Clavell, M., Korinek, J., *Accuracy of body mass index in diagnosing obesity in the adult general population*, International Journal of Obesity, vol.32, p.959-966, 2008
95. Rosén, E., Sander, U., *Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed*, Accident Analysis & Prevention vol.41, p.536–542, 2009
96. Russell, C., *Equations and Formulas for the Traffic Accident Investigator and Reconstruction*, Lawyers&Judges Publishing Company Inc., 1999
97. Rușitoru, F., Șoica, A., *Aspects Regarding the Vehicle Pedestrian Collisions*, The 4th European Academy of Forensic Science Conference, EAFS2006, Helsinki, 2006
98. Schiehlen, W., Guse, N., Seifried, R., *Multibody dynamics in computational mechanics and engineering applications*, part.II, vol.195, issues 41-43, p.5509-5522, Elsevier B. V., 2006
99. Schmidt, D. N., Nagel, D. A., *Pedestrian Impact Case Study*, Proceedings of 15th Conference American Association for Automotive Medicine, 1971
100. Searle, J. A., Searle A., *The trajectories of pedestrians, motorcycles, motorcyclists etc., following a road accident*, SAE Tehnical Paper no.831622, 1983
101. Searle, J A., *The physics of throw distance in accident reconstruction*, SAE Tehnical Paper no.930659, 1993
-

-
102. Serre, T., Perrin, C., Bohn, M., Cavallero, C., *Detailed investigations and reconstructions of real accidents involving vulnerable road users*, Expert Symposium on Accident Research, Hannover, 2004
103. Simms, C. K., Wood, D. P., *Pedestrian risk from cars and SUV's – a comparative analytical study*, Journal of Automobile Engineering vol.220, p.1085–1100, 2006
104. Simms, C. K., Wood, D. P., *Pedestrian and Cyclist Impact: A Biomechanical Perspective*, vol.166, Springer Science & Business Media, 2009
105. Slibar, A., *Die mechanischen Grundsätze des Stoßvorganges freier und geführter Körper und ihre Anwendung auf den Stoßvorgang von Fahrzeugen*, Archiv Fur Unfallforschung, 2.Jg.,H.1, 2006
106. Stcherbatcheff, G., Tarriere, C., Duclos, P., Fayon, A., Got, C., Patel, A., *Simulations of Collisions between Pedestrian and Vehicles using Adult and Child Dummies*, SAE Tehnical Paper no.751167, 1975
107. Stevenson, T. J., *Simulation Of Vehicle-Pedestrian Interaction*, thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering in the University of Canterbury, University of Canterbury, 2006
108. Struble, D.E., *Automotive accident reconstruction*, Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2014
109. Şoica, A., *Casuistic analysis of road accidents involving pedestrians*-Conference „Prevention of traffic accidents on roads 2004", Novi Sad, Yugoslavia, 2004
110. Şoica, A., Lache, S., *Theoretical and Experimental Approaches to Motor Vehicle – Pedestrian Collision*, 3rd WSEAS International Conference on applied and theoretical mechanics - Mechanics, Tenerife, Spain, 2007
111. Şoica, A., Lache, S., *Case Study Regarding the Motor Vehicle – Pedestrian Collision*, WSEAS Transactions on applied and theoretical mechanics, vol.2, 2007
112. Şoica, A., Tarulescu, S., *Impact phase in frontal vehicle-pedestrian collisions*, International Journal of Automotive Technology vol.17, no.3, p.387-397, 2016
113. Tabacu, Şt., Stănescu, N. D., Ilie, S., Hadăr, A., *Development and Validation of a Coupled Multibody - Finite Elements Model for the Analysis of the Brain Motion During Impact*, The 1st Joint International Conference on Multibody Systems Dynamics, IMSD 2010, Lappeenranta, Finland, 2010
114. Tabacu, Şt., Stănescu, N. D., Ilie, S., *Development and validation of a human head model for impact applications*, MULTIBODY DYNAMICS 2011, ECCOMAS Thematic Conference, J.C. Samin, P. Fisette (eds.), Brussels, Belgium, 2011, paper no.2524-3844, ISBN 978-2-8052-0116-5
-

-
115. Tomasch, E., *Accident reconstruction guidelines*, University of Technology, Graz, 2004
116. Toor, A., Araszewski, M., *Theoretical vs. empirical solutions for vehicle/pedestrian collisions*, ASME Paper no.2003-01-0883
117. Toor, A., Araszewski, M., Johal, R., *Revision and validation of vehicle/pedestrian collision analysis method*, SAE Technical Paper no.2002-01-0550
118. Truong, V., *Global Existence of solutions for interval-valued integro-differential equations under generalized Hukuhara differentiability*, Advances in Difference Equations, no.1, p.1-16, 2013
119. Untaru, M., Pereş, Gh., Stoicescu, A., Poţincu, Gh., Tabacu, I., *Dinamica autovehiculelor pe roţi*, Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1981
- 120.. Van Kirk, D. J., *Vehicular Accident Investigation and Reconstruction*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2001
121. Varat, M., *Crash reconstruction research*, PT-138, SAE, Warrendale, SUA, 2008
122. Wach, W., *Simulation of vehicle accidents using PC-Crash*, Institute of forensic Research Publishers, Cracow, Poland, 2011
123. Wang, B., Wang, F., Otte, D., Han, Y., *Effects of passenger car front profile and human factors on pedestrian lower extremity injury risk using German in-depth accident data*, International Journal of Crashworthiness (edition online), ian. 2018
124. Wood, D., *Aplication of a Pedestrian Impact Model to the Determination of Impact Speed*, SAE Technical Paper no.910814
125. Wood, D., Simms, K., *Confidence limits for impact speed estimation from pedestrian projection distance*, International Journal of Crashworthiness, vol.9, 2004
126. Wood, D., Simms, K., Walsh, G., *Vehicle-pedestrian collisions: validated models for pedestrian impact and projection*, Proc. IMechE vol.219, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2005
127. Wood, D., Simms, C., *Coefficient Of Friction In Pedestrian Throw, Impact – Journal of ITAI*, vol.9, 2000
128. World Health Organization (WHO), *Global Status Report on Road Safety*, Geneva, 2009
129. Xiang, G., *Fast algorithms for computing statistics under interval uncertainty*, Dissertation, University of Texas, El Paso, 2007
130. Yang. J., Kajzer, J., *Computer Simulation of Impact Response of the Human Knee Joint in Car Pedestrian Accidents*, SAE Technical Paper no.922525
133. *** ASME PTC 19.1, *Measurement Uncertainty*. American Society of Mechanical Engineers, NY, 2004
-

-
134. *** *Crash test dummy*, Wikipedia, free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Crash_test_dummy (accesat 2017)
 135. *** DSD. *PC-Crash Operating and Technical Manual*, 2015
 136. *** DSD. *Doctor Steffan Datentechnik*, Linz, <http://www.dsd.at> (accesat 2017)
 137. *** *EES Database Katalog Dr. Melegh*
 138. *** EuroNCAP. *The European New Car Assessment Programme*, <http://www.euroncap.com> (accesat 2018)
 139. *** *Expression of the Uncertainty of the Measurement in Calibration*, European co-operation for Accreditation, Geneva, 2000
 140. *** Fastec Imaging. *HiSpec 5 Datasheet*, http://www.fastecimaging.com/images/fastec/PDF/hispec/fastecimaging_hispec5.pdf (accesat 2018)
 141. *** *First Technology Safety Systems (FTSS) History of Crash Test Dummies*, <http://www.humaneticsatd.com> (accesat 2017)
 142. *** Guvernul României, *Strategia națională pentru siguranță rutieră pentru perioada 2016-2020 și a Planului de acțiuni pentru implementarea acesteia*, Monitorul Oficial nr. 902/09.11.2016
 143. *** ISO. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*, ISO, Geneva, 1997
 144. *** ISO 6487, Standard, *Road vehicles - Measurement techniques in impact tests - instrumentation*, ed. 6, 2015
 145. *** MADYMO. *Design, Simulation and Virtual Testing. Theory Manual*, version 7.6, <http://www.tassinternational.com> (accesat 2015)
 146. *** MADYMO. *Design, Simulation and Virtual Testing. Model Manual*, version 7.6, <http://www.tassinternational.com> (accesat 2015)
 147. *** MADYMO. *Design, Simulation and Virtual Testing. Human Model Manual*, version 7.6, <http://www.tassinternational.com> (accesat 2015)
 148. *** NASA Handbook. *Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods*, Washington, July 2010
 149. *** *Ranking EU progress on road safety*, 11th Road Safety Report of European Transport Safety Council, iunie 2017
 150. *** SAE J211, Standard, *Instrumentation for impact tests (echipare pentru testele de coliziune)*, Rev.3, 1995
 151. *** *Statistic Toolbox for Use with Matlab*, <http://www.mathworks.com>, 2014
 152. *** www.epp.eurostat.ec.europa.eu (accesat 2018)
-