

UNIVERSITATEA TEHNICĂ
„GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
ȘCOALA DOCTORALĂ A UNIVERSITĂȚII



REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

NOI SENZORI PENTRU CÂNTĂRIREA
AUTOVEHICULELOR ÎN MIȘCARE ȘI
MONITORIZAREA TRAFICULUI RUTIER

Autor: drd. ing. **Marius MIHĂILĂ**

Conducător științific: prof. univ. em. dr. ing. **Paul Doru BÂRSĂNESCU**

CUPRINS

INTRODUCERE	5
CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL SENZORILOR DE CÂNTĂRIRE ÎN MIȘCARE ȘI OBIECTIVELE TEZEI	5
1.1 PROBLEME DE SIGURANȚĂ RUTIERĂ	5
1.2 MANAGEMENTUL SIGURANȚEI RUTIERE	6
1.2.1 Rețeaua drumurilor deschise circulației publice din ROMÂNIA	7
1.3 CLASIFICAREA AUTOVEHICULELOR	7
1.4 DETERIORAREA INFRASTRUCTURII RUTIERE	7
1.5 SISTEME PENTRU MONITORIZAREA TRAFICULUI	8
1.6 CÂNTĂRIREA VEHICULELOR	8
1.7 SISTEME DE CÂNTĂRIRE	9
1.7.1. Scurta istorie a sistemelor de cântărire în mișcare	9
1.7.2 Cântărirea pentru detectare și sancționare	9
1.7.3 Tipuri de senzori pentru cântărirea în mișcare	9
1.7.4 Performanțele senzorilor	10
1.7.5 Structura unui sistem de cântărire WIM	10
CAPITOLUL 2: DESCRIEREA APARATURII EXPERIMENTALE	11
2.1 PULSATORUL INSTRON 8801	11
2.2 PUNTEA TENSOMETRICĂ VISHAY P3	11
2.3 ROZETE TENSOMETRICE	11
CAPITOLUL 3: PROIECTAREA SENZORULUI WIM	12
3.1 SCHEMA LOGICĂ DE PROIECTARE A SENZORULUI WIM	12
3.2 CERINȚELE IMPUSE PROIECTĂRII	13
3.3 ANALIZĂ CU ELEMENTE FINITE	13
3.4 MODELUL TEORETIC DE STUDIU	13
3.4.1 Modelul CAD	13
3.4.2 Modelarea interacțiunii dintre obiecte	14
3.5 ESTIMAREA ANDURANȚEI SENZORULUI	19
CAPITOLUL 4: CERCETĂRI EXPERIMENTALE ÎN LABORATOR	20
4.1 SENZOR CU SENSIBILITATE RIDICATĂ, PENTRU CÂNTĂRIREA AUTOVEHICULELOR DIN TRAFICUL URBAN	20
4.1.1 Descrierea senzorului	20
4.1.2 Materiale	21
4.1.3 Geometrie	25
4.2 ETALONAREA STATICĂ A SENZORULUI	27
4.2.1 Echipamente utilizate și programul de încercări	27
CAPITOLUL 5: TESTAREA SENZORULUI ÎN CONDIȚII REALE	28
5.1 CÂNTĂRIREA AUTOVEHICULELOR	28

CAPITOLUL 6: ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A MODELULUI PROPUȘ ȘI VALIDAREA ACESTUIA	31
6.1 MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A ETALONĂRII STATICE	31
6.2 MODELAREA NUMERICĂ A SENZORULUI	33
CAPITOLUL 7: MODELAREA NUMERICĂ A INTERACȚIUNII ROATĂ-SENZOR ÎN REGIM TRANZITORIU PRIN METODA ELEMENTELOR FINITE	34
7.1 Introducere	34
7.2 MODELUL GEOMETRIC	34
7.3 DISCRETIZAREA MODELULUI GEOMETRIC ÎN ELEMENTE FINITE	35
7.4 SCHEMA DE ÎNCĂRCARE/DESCĂRCARE	36
7.5 REZULTATE OBTINUTE	37
7.5.1 scenariul i: încărcare 350kg pe roată	38
7.5.2 scenariul li: încărcare 700kg pe roată	38
7.5.3 scenariul lii: încărcare 1000kg pe roată	39
7.5.4 scenariul V: Viteza de 1,6 m/s	39
7.5.5 scenariul V: Viteza de 2 m/s	40
7.5.6 scenariul V: Viteza de 3 m/s	40
CAPITOLUL 8: DEVIZUL DE CHELTUIELI PENTRU IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM DE CANTARIRE ÎN MIȘCARE A AUTOVEHICULELOR	41
CONCLUZII GENERALE	42
CONTRIBUȚII PROPRII	44
DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	46
BIBLIOGRAFIE	47

INTRODUCERE

Având în vedere ponderea ridicată a transportului rutier și creșterea continuă a traficului, vitezelor și sarcinilor pe punte, mai ales în cazul vehiculelor comerciale, studiile recente din literatura de specialitate indică faptul că monitorizarea acestor parametri nu poate fi realizată eficient fără utilizarea senzorilor specializați pentru cântărirea în mișcare (Federal Highway Administration, 2007; Lam, Lee, Lee, Nguyen, Vy, Han, & Yoon, 2025; Mihăilă, Bârsănescu, & Morăraș, 2022a; Ryguła, Brzozowski, Grygierek, & Socha, 2024; Weigh in motion, 2025). Astfel, acești senzori reprezintă un element indispensabil în gestionarea și menținerea siguranței și eficienței infrastructurii rutiere. I

De asemenea, se estimează că utilizarea senzorilor de cântărire în mișcare contribuie la scăderea considerabilă a numărului de accidente, a consumului de combustibil și implicit a poluării. Cu toate acestea, în cazurile de dispută se preferă cântărirea finală cu platforme fixe, considerată a fi mai precisă, deoarece la cântărirea în mișcare se estimează forța statică în urma măsurării unor încărcări dinamice și astfel, inevitabil, erorile sunt mai mari (tipic $\pm 10\%$).

Această teză și-a propus să aducă contribuții la studiul și dezvoltarea senzorilor WIM care permit cântărirea și clasificarea autovehiculelor din mediul urban, fără a perturba traficul. S-a urmărit realizarea unor senzori ieftini, fiabili, cu sensibilitate ridicată și care necesită un timp redus pentru montare/demontare. În cadrul tezei se prezintă stadiul actual și tendințele în dezvoltarea tehnologiilor WIM, analizând atât tipurile comerciale, cât și noile tipuri de senzori WIM. Analiza realizată prezintă critic avantajele și dezavantajele diverselor tipuri de senzori WIM. În urma acestor studii, s-a dezvoltat un sistem de cântărire în mișcare care oferă beneficii semnificative, precum reducerea semnificativă a costurilor de producție în comparație cu alte sisteme, fiabilitate crescută și mentenanță ușoară post montaj.

CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL SENZORILOR DE CÂNTĂRIRE ÎN MIȘCARE ȘI OBIECTIVELE TEZEI

1.1 PROBLEME DE SIGURANȚĂ RUTIERĂ

Tendința de supraîncărcare a autovehiculelor crește probabilitatea apariției unor accidente rutiere, mai ales datorită accelerării uzurii acestora, scăderea remarcabilă a manevrabilității, creșterea considerabilă a distanțelor de frânare, oboseala prematură a conducătorilor auto etc.

Potrivit datelor statistice prezentate în *Fig. 1.1*, singura excepție notabilă referitoare la scăderea graduală a numărului de evenimente rutiere poate fi observată în anul 2020, când au fost impuse restricțiile de mobilitate în contextul apariției epidemiei de Coronavirus (COVID-19).

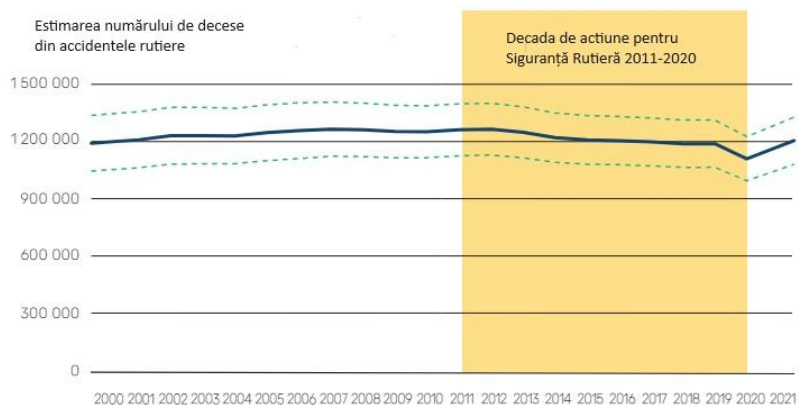


Fig. 1.1. Estimarea numărului de decese din accidente rutiere, (Organizația Mondială a Sănătății, 2012a, 2012b, 2016, 2020)

Astăzi se pot face analize pe diferite sectoare de drum pentru a identifica care dintre drumuri prezintă o situație gravă față de media națională, acest lucru fiind foarte important deoarece se pot realiza prioritizări (Centrul de Studii Tehnice Rutiere și Informatică, 2023).

Progresele înregistrate în ceea ce privește reducerea deceselor cauzate de accidente rutiere la nivelul Uniunii Europene au stagnat destul de mult în ultimii ani, acest lucru arătând că ținta actuală pe termen mediu a Uniunii Europene nu poate fi atinsă. Deși decesele cauzate de accidentele rutiere au înregistrat o scădere cu 20% între anii 2010-2017, vătămrile grave s-au redus numai cu numai 5% (Inspectoratul General al Poliției Române, 2012; Dumbravă, 2018).

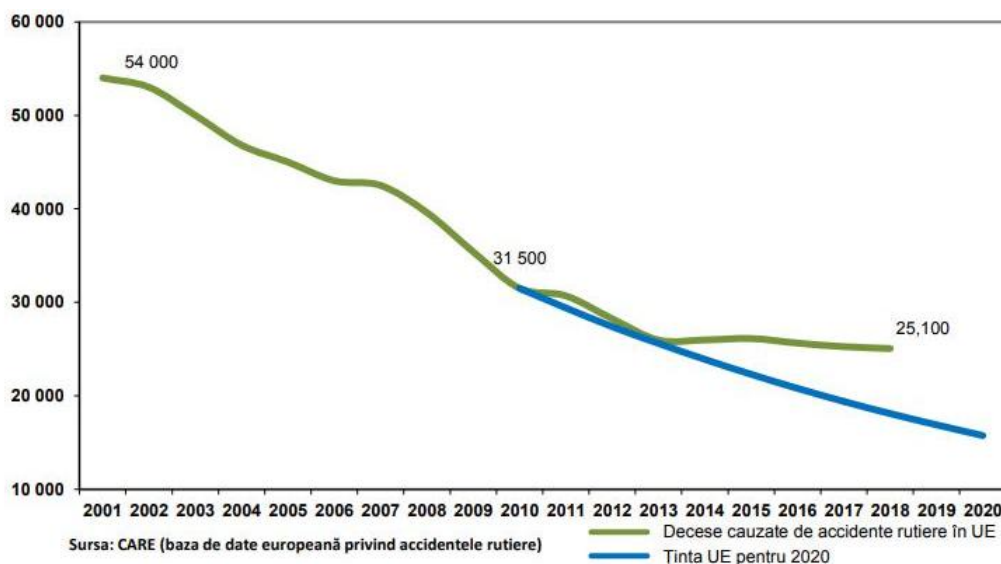


Fig. 1.2. Evoluția numărului deceselor cauzate de accidente rutiere în UE și țintele pentru 2001-2020

1.2 MANAGEMENTUL SIGURANȚEI RUTIERE

Procesul de reducere considerabilă a victimelor din accidente rutiere printr-un sistem sau o structură complexă care implică cooperarea și interacționarea organismelor care sprijină procesele și sarcinile necesare prevenirii și reducerii victimizării, poate fi definit ca management al siguranței rutiere (Papadimitriou & Yannis, 2013; Hagenzieker, 2010).

1.2.1 REȚEAUA DRUMURILOR DESCHISE CIRCULAȚIEI PUBLICE DIN ROMÂNIA

România avea la sfârșitul anului 2023 o rețea de drumuri publice care totaliza 86.388 km, dintre care 17.677 km drumuri naționale, 35.046 km drumuri județene, și 33.665 km drumuri comunale. Din totalul lungimii drumurilor naționale, 6189 km erau drumuri internaționale, 997 km și 70km drumuri expres.

1.3 CLASIFICAREA AUTOVEHICULELOR

Pe drumurile deschise circulației publice circulă o varietate foarte mare de vehicule cum ar fi bicicletele, motocicletele, autoturismele, autobuzele, autocamioanele în diferite configurații etc., toate acestea alcătuind categorii de vehicule care sunt clasificate după diverse criterii, factorul cel mai important pentru clasificare fiind reprezentat de numărul de punți utilizate.

Fiecare punte a unui vehicul este echipată cu un anumit număr de roți, stabilit în funcție de necesitățile tehnice. Roțile sunt alcătuite din butuc, disc, jantă și pneu, iar funcționarea lor corectă contribuie la siguranța în trafic.

1.4 DETERIORAREA INFRASTRUCTURII RUTIERE

Efectul distructiv al traficului greu asupra tuturor drumurilor este foarte important în determinarea structurilor rutiere eficiente pentru fiecare categorie de drum în parte.



Fig. 1.3. Fotografie care demonstrează efectul distructiv al traficului greu asupra drumului (Lees, 2024)

Nerespectarea încărcării maxime admise pe osie conduce la degradarea accelerată a infrastructurii rutiere chiar dacă se realizează lucrări de întreținere pe aceste sectoare de drumuri, iar efectul direct al creșterii încărcăturii pe osie este mult mai sever pe timpul verii când temperaturile

sunt ridicate și astfel este favorizată apariția fâgașelor, (Alkaissi, 2018; Albayati, 2023; Guo, Liu, Feng, Li, & Ge, 2025; Cheng, Zhang, & Li, 2007).

Dimensionarea structurilor rutiere are ca obiectiv principal alegerea materialelor potrivite cu grosimile corespunzătoare pentru alcătuirea unei structuri rutiere optime, care să țină cont de costurile de execuție dar și de întreținere, structură care să poată prelua încărcările din trafic pe o perioadă stabilită.

1.5 SISTEME PENTRU MONITORIZAREA TRAFICULUI

Detectarea autovehiculelor este esențială pentru a obține informații precise despre trafic în timp real sau ulterior, existând o varietate de tehnologii care pot furniza astfel de date.

Detecția vehiculelor și sistemele de supraveghere sunt, astfel, componente esențiale ale ITS, contribuind activ la colectarea și utilizarea datelor necesare pentru îmbunătățirea continuă a acestuia.

Clasificarea acestor senzori se împarte în două categorii:

- Senzori intruzivi – montați în partea carosabilă;
- Senzori neintruzivi – montați pe stâlpi, poduri, porți deasupra șoselei, pe poduri etc.

1.6 CÂNTĂRIREA VEHICULELOR

Cântărirea se poate face în mod static, utilizând platformele fixe sau mobile. Aceste platforme utilizează balanțe cu brațe inegale sau platforme cu senzori de forță. Un alt mod de cântărire poate fi cel dinamic cu viteză redusă, utilizat de obicei la intrarea și ieșirea dintr-o incintă sau la punctele de trecere a frontierei, sau cântărirea cu viteză ridicată care este realizată prin intermediul senzorilor montați în partea carosabilă sau pe structura podurilor.

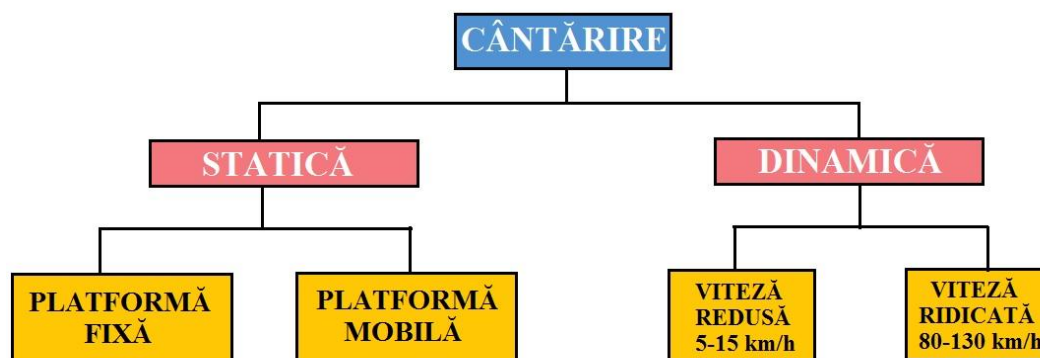


Fig. 1.4. Clasificarea metodelor de cântărire (Bârsănescu et al., 2009)

1.7 SISTEME DE CÂNTĂRIRE

1.7.1. SCURTA ISTORIE A SISTEMELOR DE CÂNTĂRIRE ÎN MIȘCARE

Sistemul a fost utilizat pentru prima dată în Statele Unite ale Americii în anii 1950 de profesorul Clyde Lee și în 1961 a fost introdus ASSHO în testele de drumuri. La origine sistemul a fost creat să colecteze informații despre încărcarea autovehiculelor în scopul proiectării infrastructurii rutiere.

1.7.2 NECESITATEA CÂNTĂRIRII ÎN MIȘCARE

În prezent, specialiștii din domeniu lucrează la conceperea unor senzori WIM care vor fi ulterior interconectați cu alte tipuri de senzori, putând astfel să furnizeze mult mai multe date, cum ar fi:

- *Ecartamentul punții;*
- *Poziția autovehiculului față de axa benzii;*
- *Detectarea pneurilor simple/duble;*
- *Dimensiunile amprentei pneului (lungime/lățime);*

1.7.3 TIPURI DE SENZORI PENTRU CANTARIREA ÎN MIȘCARE

În general, un sistem complet de cântărire conține un set de senzori de cântărire, fie montați în partea carosabilă sau atașați unui pod, o unitate centrală instalată în afara drumului (care conține toată aparatura electronică, precum plăcile de achiziție), unitățile de procesare cu software de calculare a greutății, hard de stocare, sursa de curent și dispozitive de comunicare.

Senzorii de cântărire în mișcare funcționează în condiții vitrege, cum ar fi vibrații, diferențe mari de temperaturi, apă, sare, gheață, nisip, praf etc. Dar, datorită utilizării acestor senzori pentru depistarea autocamioanelor supraîncărcate, se poate extinde semnificativ durata de exploatare a unui drum.

Există mai multe tipuri de senzori care sunt utilizați pentru cântărirea în mișcare:

- *Cu traductoare electrotensometrice rezistive („marci tensometrice”);*
- *Piezoelectrics;*
- *Cu fibră optică;*
- *Capacitivi;*
- *Pneumatici;*
- *Hidraulici.*

1.7.4 PERFORMANȚELE SENZORILOR

În *Tabelul 1.1* se prezintă o comparație între performanțele senzorilor comercializați în prezent. Se observă că senzorul cu doză tensometrică este cel mai precis, are cea mai lungă viață, însă este și cel mai scump (inclusiv instalarea și întreținerea). Senzorul piezoelectric este cel mai puțin precis și fiabil, însă implică cheltuielile cele mai mici.

Tabelul 1.1. Comparație între performanțele senzorilor comercializați (Bushman & Pratt, 1998)

	DOZĂ TENSOMETRICĂ	PLACĂ FLEXIBILĂ	PIEZOELECTRIC CU CUART
Acuratețe (pentru 95% încredere)	±6%	±10%	±15%
Viața medie (ani)	12	6	4
Cost de instalare inițială (USD)	48.700	21.500	9.000
Cheltuieli de întreținere anuale (USD)	8.300	6.400	4.750

1.7.5 STRUCTURA UNUI SISTEM DE CANTARIRE WIM

Sistemul de cântărire a vehiculelor în mișcare (WIM) constă în principal din unitatea de cântărire, unitatea de identificare a punților, echipamentul de detecție a autovehiculului, colectorii de date și unitățile de procesare, precum și alte echipamente auxiliare (Wang, 2010).

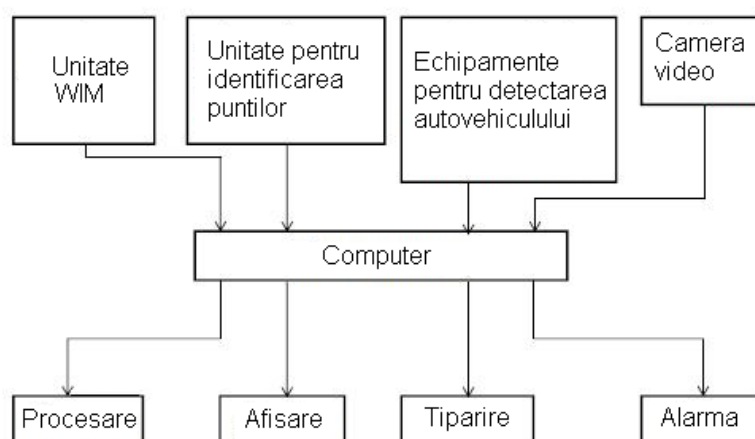


Fig. 1.5. Structura unui sistem de cântărire WIM

CAPITOLUL 2: DESCRIEREA APARATURII EXPERIMENTALE

2.1 PULSATORUL INSTRON 8801

Sistemul de testare servohidraulic 8801, *Fig. 2.1*, realizează testare statică și dinamică, pentru materiale metalice și nemetalice, permițând testarea atât pe epruvete cât și pe componente. Acest sistem de testare se poate utiliza pentru încercările statice, de oboseală, pentru testarea la oboseală mecanică și de mecanica ruperii. (Instron, 2024).



Fig. 2.1. Pulsatorul INSTRON 8801

2.2 PUNTEA TENSOMETRICĂ VISHAY P3

Puntea VISHAY P3 este o punte tensometrică portabilă, cu 4 canale de monitorizare și înregistrare a deformațiilor cu mărci tensometrice.

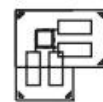
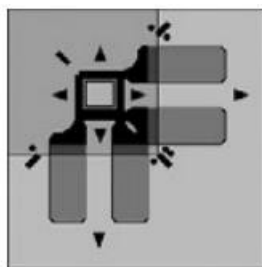


Fig. 2.2. Puntea VISHAY P3 (Vishay Micro-Measurements, 2011)

2.3 ROZETE TENSOMETRICE

Traductoare de uz general—Rozetă tip T, cu două grile *Fig. 2.3*.

032WT



actual size

Fig. 2.3. Rozeta Vishay cu două grile perpendiculare de tip T, model 032WT, (Vishay Micro-Measurements, n.d.)

CAPITOLUL 3: PROIECTAREA SENZORULUI WIM

Obiectivul acestui studiu este de a utiliza analiza cu elemente finite (FEM) în proiectarea senzorilor WIM, care sunt destinați traficul auto urban. Acești senzori trebuie să îndeplinească următoarele cerințe: să aibă o geometrie cât se poate mai simplă, să reziste sarcinilor exterioare, să fie ieftin în producere, să fie ușor și ieftin la montare pe șosea și să fie cât se poate mai sensibil.

În acest capitol a fost examinat printr-o analiză structurală prin metoda cu elemente finite a senzorului WIM cu placă elastică cilindrică. Analiza structurală statică a fost realizată, iar rezultatele au demonstrat conformitatea construcției cu cerințele specificate.

3.1 SCHEMA LOGICĂ DE PROIECTARE A SENZORULUI WIM

Pentru proiectarea senzorului WIM trebuie să se parcurgă pașii din schema logică de proiectare prezentată în Fig. 3.1. Toate etapele din schema prezentată în Fig. 3.1 trebuie să fie efectuate.

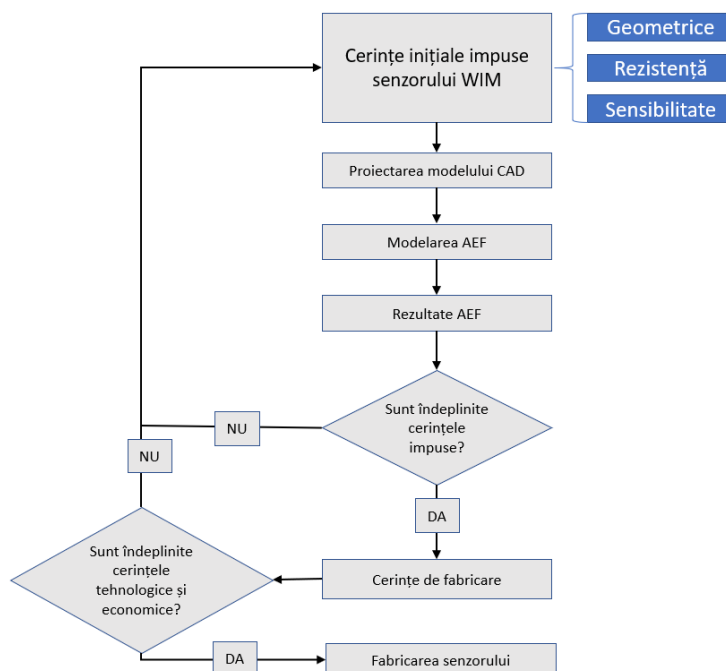


Fig. 3.1. Schema logică de fabricare a unui senzor WIM

3.2 CERINȚELE IMPUSE PROIECTĂRII

- Să fie ușor de instalat pe șosea;
- Să reziste sarcinilor provenite din trafic și condițiilor din mediu;
- Să ofere sensibilitate mare;
- Fabricarea și instalarea senzorului să fie ieftine;
- Timpul consumat la schimbare, fabricare și instalare să fie cât mai mic;
- Material de construcție: oțel structural IS 2062 E390.

3.3 ANALIZĂ CU ELEMENTE FINITE

În general, procesul de analiză a elementelor sau ansamblurilor mecanice utilizând Metoda Elementelor Finite (MEF) implică trei etape principale, așa cum este prezentat în Fig. 3.2:

- I Pre-procesarea - definirea modelului și factorii de mediu care se aplică acestuia (în mod tipic un model cu elemente finite);
- II Analiza (de obicei, efectuate pe calculatoarele performante);
- III Post-procesarea rezultatelor (folosind instrumente performante de vizualizare).

Acest proces este repetat în mod frecvent, uneori de mai multe ori, atât manual, cât și utilizând software dedicate.

Pre-procesarea implică construirea unui model matematic al elementului care urmează să fie analizat. Există mai multe modalități de a realiza această operație, dar cea mai comună metodă este preluarea unui model CAD și împărțirea acestuia în părți mici, de formă regulată, proces numit discretizare. Fiecare parte se numește element ("element finit"), iar punctele situate în colțurile elementelor sunt numite noduri.

Precizia și calitatea rezultatelor depind în mare măsură de numărul de elemente finite utilizate și calitatea rețelei. Dar, odată cu creșterea numărului de elemente, va crește și timpul de procesare a datelor. Prin urmare, se caută să se găsească un echilibru între precizia rezultatelor și timpul de procesare.

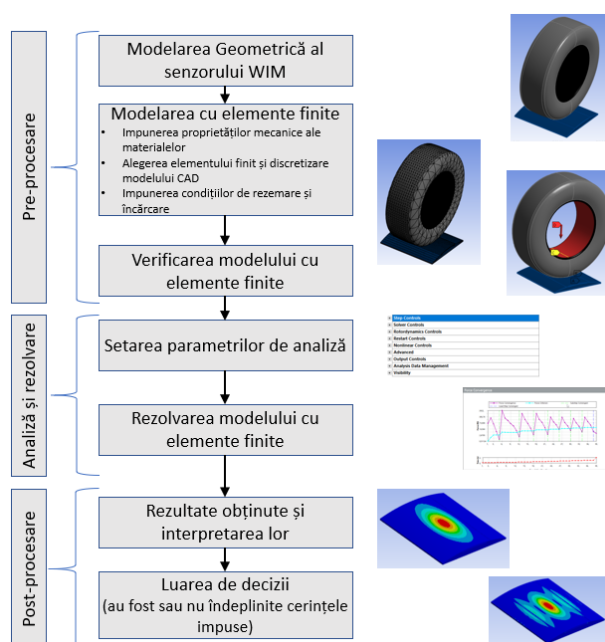


Fig. 3.2. Schema de analiză cu elemente finite utilizată în studiu senzorului WIM

3.4 MODELUL TEORETIC DE STUDIU

3.4.1 MODELUL CAD

Pentru a efectua o analiză cu elemente finite a unei structuri, primul pas esențial este elaborarea modelului de calcul corespunzător structurii respective.

Elaborarea unui model de calcul corect și eficient depinde de anumiți factori și trebuie să îndeplinească anumite condiții. În analiza cu elemente finite, se utilizează un concept mai general și mai simplu al structurii decât în modul obișnuit. Termenul "structură" se referă, în general, la un ansamblu de bare, plăci, învelișuri și volume (solide).

Pentru simularea cu elemente finite au fost proiectate două modele CAD de senzor WIM *Fig. 3.3* ce urmează să fie studiate și selectate în funcție de cerințele impuse. În *Fig. 3.3* este reprezentat modelul nr.1 de studiu, care este alcătuit din platbandă de grosime de 4mm pentru elementul flexibil și 5mm pentru placa de bază.

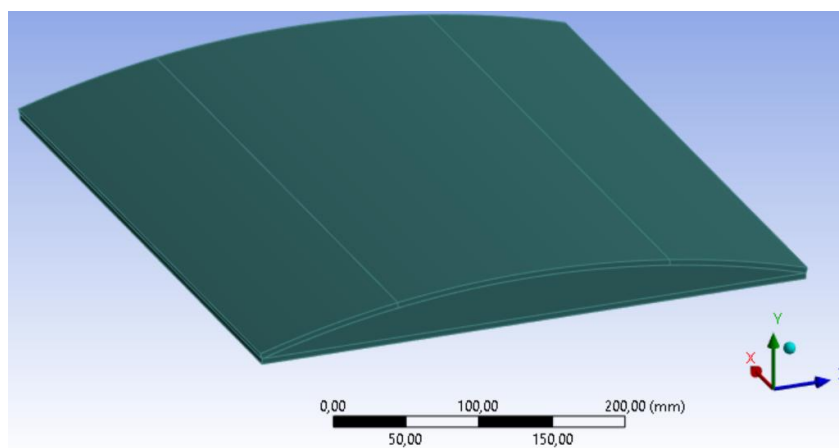


Fig. 3.3. Modelul geometric

3.4.2 SCHEMA DE INCARCARE-REZEMARE

Condițiile de rezemare și încărcare se prezintă în *Fig. 3.4*, iar asupra ansamblului care modelează roata este aplicată o forță cu valoarea de **5000 N**, deplasarea roții a fost impusă $DX=DZ=0$ și $DY=liber$ și deplasarea senzorului s-a impus $DX=DY=DZ=0$. Au fost studiate 4 scenarii pentru ambele modele geometrice care au fost încărcate la fel. Anvelopa este considerată presurizată.

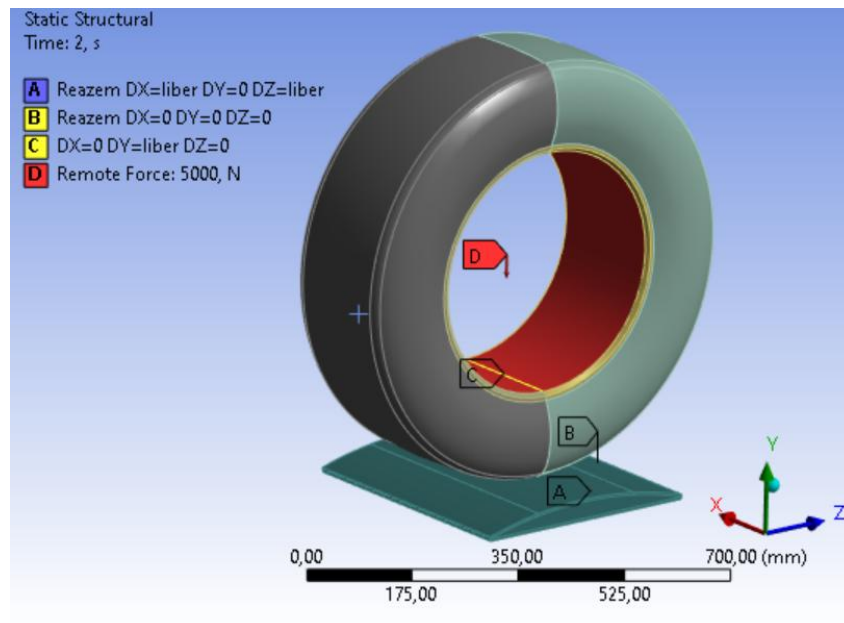


Fig. 3.4. Schema de încărcare-rezemare pentru modelul geometric nr. 1

3.4.2.1 REZULTATE AEF MODEL 1 SENZOR WIM FĂRĂ FANTĂ

Rezultatele obținute în urma modelării pentru scenariul I, prin metoda elementelor finite, cu parametrii de analiză descriși mai sus, sunt prezentate în figurile Fig. 3.5-**Error! Reference source not found.** Se prezintă deformațiile totale pe modelul global al senzorului și pe zona de interes, distribuția de tensiuni echivalente von Mises pe modelul global și pe zona de interes, distribuția deformațiilor specifice echivalente pe modelul global și pe zona de interes și deformațiile specifice în lungul axei X și a axei Z pe modelul global și pe zona ce prezintă interes. Calculele s-au verificat după criteriul de tip Structural Error, care impune valori mai mici de 0,1-0,15 pe element, pentru elemente din zona inspectată.

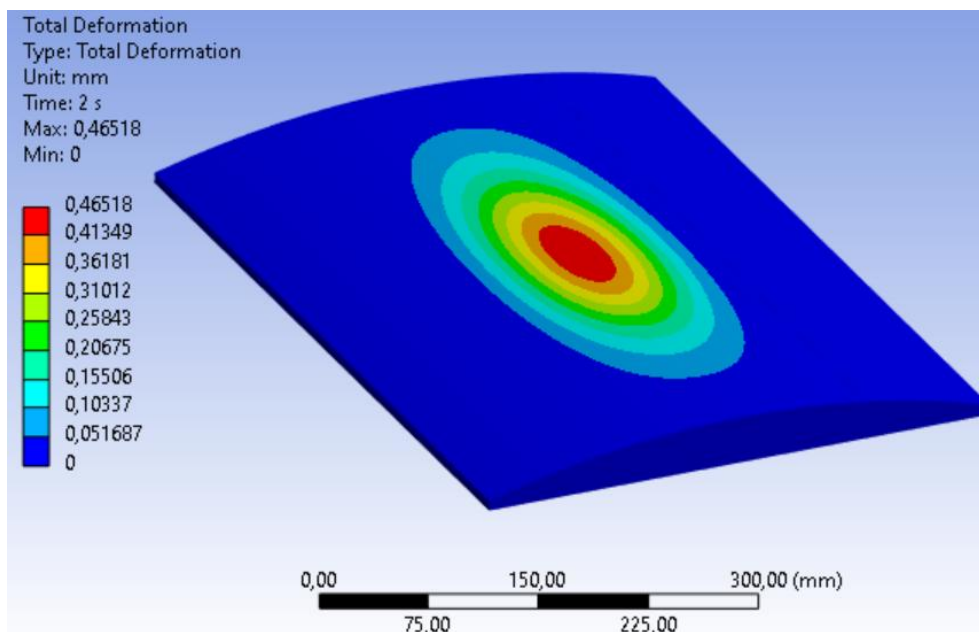


Fig. 3.5. Deformațiile totale pe modelul global al senzorului (scenariul I)

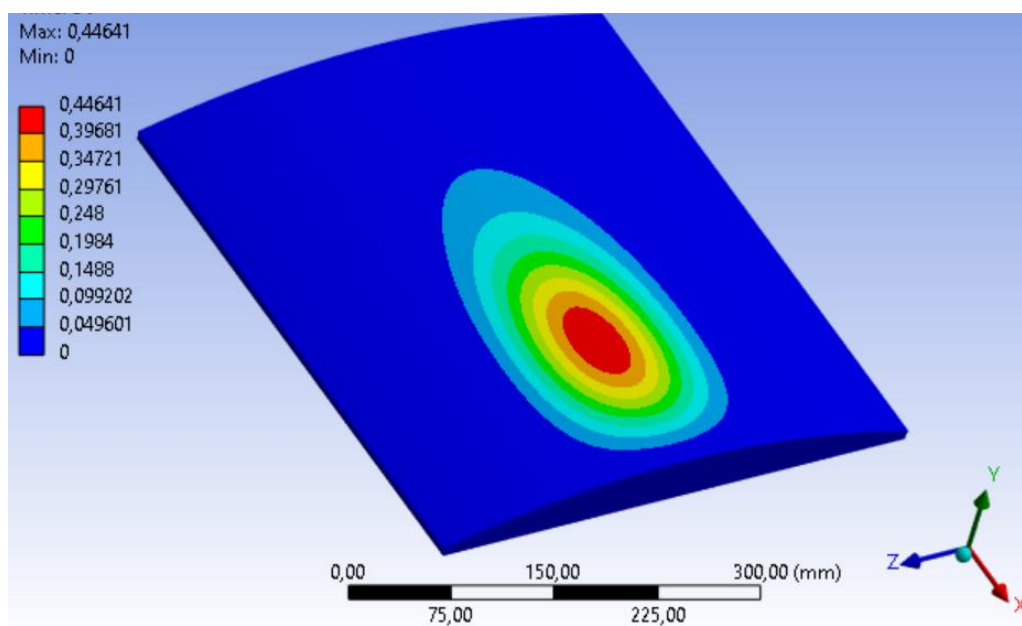


Fig. 3.6. Deformațiile totale pe modelul global al senzorului (scenariul II)

3.4.2.2 **DESCRIEREA CALCULULUI DE ANDURANȚĂ PENTRU SENZORUL WIM BAZAT PE RECENSĂMÂNTUL DE TRAFIC DIN MUNICIPIUL PIATRA-NEAMȚ**

Pentru a determina anduranța unui senzor WIM (Weigh-In-Motion) montat pe una dintre arterele de circulație din municipiul Piatra-Neamț, s-a realizat un recensământ de trafic pe două dintre principalele rute urbane prezentate în Tabel 3.1 și

Tabel 3.2: Bulevardul Traian și Strada Bistriței. Această analiză urmărește să estimeze volumul de vehicule și impactul acestora asupra senzorului, în condiții reale de trafic urban.

Tabel 3.1. Recensământ de trafic pe artera de circulație Bulevardul Traian din Municipiul Piatra-Neamț

BD. TRAIAN	28.05.2024	03.06.2024	12.06.2024
AUTOVEHICULE ȘI AUTOUTILITARE UȘOARE	615	723	668
AUTOUTILITARE MARE TONAJ	2	4	1
AUTOBUZE	4	5	4
TOTAL	621	732	673

Tabel 3.2. Recensământ de trafic pe artera de circulație Strada Bistriței din Municipiul Piatra-Neamț

STR. BISTRITȚEI	28.05.2024	03.06.2024	12.06.2024
AUTOVEHICULE ȘI AUTOUTILITARE UȘOARE	817	794	824
AUTOUTILITARE MARE TONAJ	11	16	19
AUTOBUZE	7	8	6
TOTAL	835	818	849

1. Categoriile de vehicule înregistrate

S-au identificat trei principale categorii de vehicule care au fost luate în considerare pentru analiza duranței senzorului:

- Autoturisme și autoutilitare ușoare: acestea au un impact relativ scăzut asupra senzorului, fiind vehicule de tonaj redus.
- Autoutilitare de mare tonaj: acestea generează o sarcină semnificativă asupra senzorului, având un impact major asupra duranței sale.
- Autobuze: de asemenea, influențează în mod semnificativ duranța senzorului datorită masei lor ridicate și a traficului frecvent pe aceste artere.

2. Datele colectate din recensământ

Bulevardul Traian

Datele colectate pe Bulevardul Traian (Tabelul 3.1) arată un flux mediu zilnic de vehicule pe sens, cu o medie zilnică de 675,33 vehicule. Dintre acestea, ponderea vehiculelor grele (autoutilitare de mare tonaj și autobuze) este relativ scăzută comparativ cu autoturismele și autoutilitarele ușoare, dar acestea au un impact disproporționat asupra rezistenței senzorului.

Strada Bistriței

Pe Strada Bistriței (Tabelul 3.2), traficul înregistrat este ușor mai ridicat, cu o medie zilnică de 834 vehicule, fiind influențat de faptul că această stradă reprezintă o variantă ocolitoare a orașului, frecventată de vehicule comerciale de mare tonaj și autobuze, având o proporție mai mare de vehicule grele în comparație cu Bulevardul Traian.

3. Evaluarea duranței senzorului WIM

Senzorul WIM este conceput să măsoare greutatea vehiculelor în mișcare și să reziste la solicitări mecanice repetate pe termen lung. În evaluarea duranței acestuia, s-au luat în considerare următorii factori:

- Numărul total de vehicule: aproximativ 675 pe Bulevardul Traian și 834 pe Strada Bistriței în intervalul de observație.

Proporția vehiculelor grele: vehiculele grele (autoutilitare de mare tonaj și autobuze) reprezintă în medie 1% din traficul total pe Bulevardul Traian și aproximativ 3% pe Strada Bistriței. Aceste vehicule sunt esențiale pentru estimarea rezistenței la oboseală a senzorului, având în vedere faptul că impactul lor mecanic este semnificativ mai mare decât al vehiculelor ușoare (autoturisme, motociclete).

Frecvența de trecere și distribuția pe zile: traficul a fost monitorizat pe parcursul a trei zile, ceea ce permite o estimare a ciclurilor de încărcare pe mai termen lung, pe baza mediei zilnice a vehiculelor. Pentru a estima durata de viață a senzorului WIM proiectat și realizat în cadrul tezei, se vor considera numai autovehiculele grele care tranzitează strada Bistriței din Piatra Neamț, care este cea mai circulată.

Din Tabelul 3.2 se pot extrage următoarele date:

- Timp de 3 zile, în care traficul a fost monitorizat, au trecut 67 de autovehicule grele (autoutilitare de mare tonaj și autobuze);
- Media zilnică a fost de circa 22 autovehicule grele;
- Considerând că un autovehicul greu are în medie 4 punți, aceasta înseamnă 88 de punți/zi sau 32.120 punți/an.

3.4.2.3 **REZULTATE AEF MODEL 2, SENZOR WIM CU FANTĂ**

Rezultatele obținute în urma modelării pentru scenariul I, prin metoda elementelor finite, cu parametrii de analiză descriși mai sus, sunt prezentate în figurile *Fig. 3.7-Error! Reference source not found.* Se prezintă deformațiile totale pe modelul global al senzorului și pe zona de interes, distribuția de tensiuni echivalente von Mises pe modelul global și pe zona de interes, distribuția deformațiilor specifice echivalente pe modelul global și pe zona de interes și deformațiile specifice în lungul axei X și a axei Z pe modelul global și pe zona ce prezintă interes. Calculele s-au verificat după criteriul de tip Structural Error, care impune valori mai mici de 0,1-0,15 pe element, pentru elemente din zona inspectată. Valorile maxime și locația lor se pot identifica din figuri, comparații dintre rezultatele primite în diferite scenarii analizate în cadrul acestui studiu, se prezintă la sfârșitul capitolului.

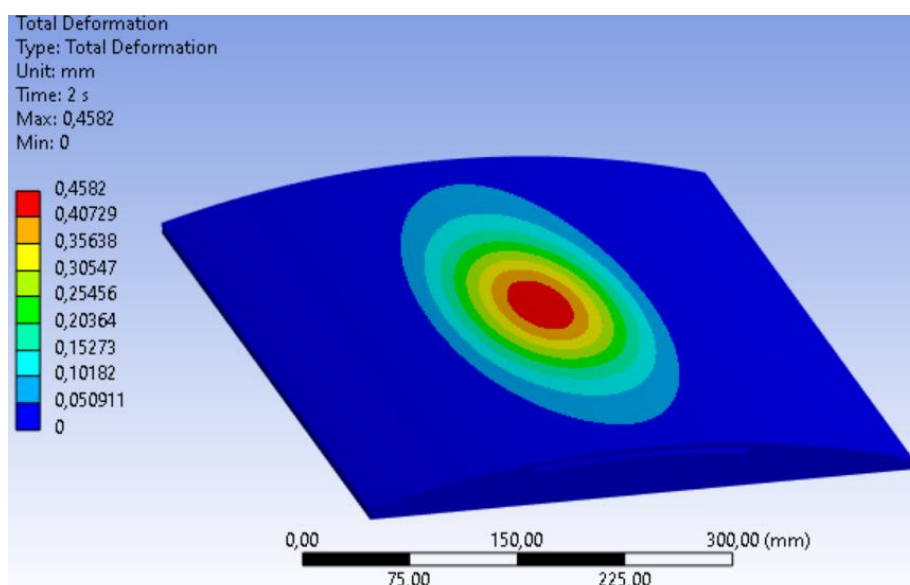


Fig. 3.7. Deformațiile totale pe modelul global al senzorului (scenariul I)

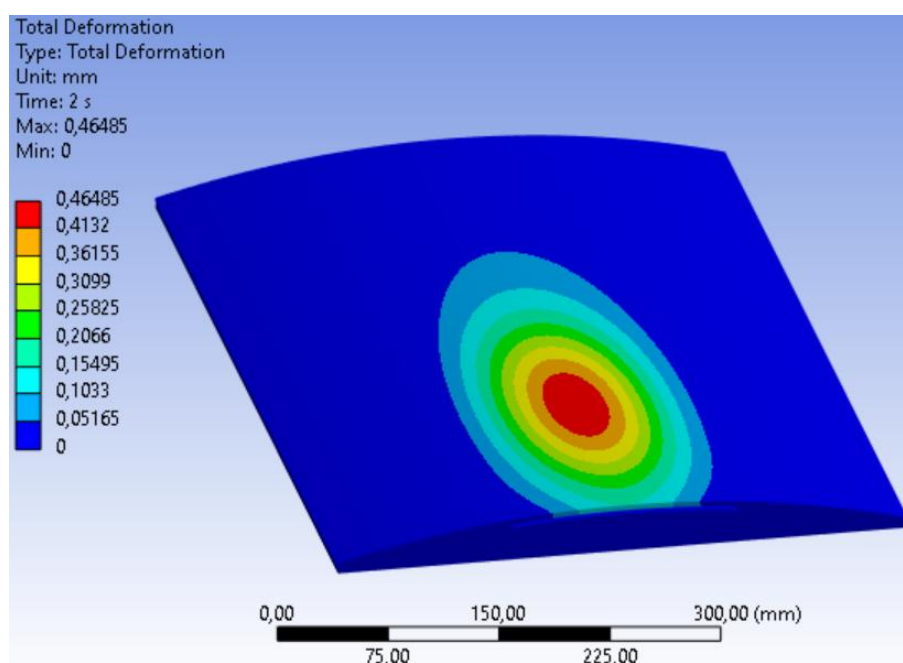


Fig. 3.8. Deformațiile totale pe modelul global al senzorului (scenariul II)

3.4.2.4 COMPARAȚII ÎNTRE MODELELE STUDIATE

În Figurile 3.45 și 3.46 sunt prezentate comparații între deformările specifice din elementul elastic al senzorilor cu fantă și fără fantă, pentru forța amplasată la mijlocul senzorului și respectiv la 100mm de un capac. Se observă că, pentru cel de-al doilea scenariu, senzorul cu fantă este de 5 ori mai sensibil ($250E-6$) față de senzorul fără fantă ($50E-6$) în zona capacului (Figura 3.46). Pentru senzorul cu fantă s-a depus la OSIM cererea de brevet RO 137668 A2/2022 (Mihăliă M. s.a., 2020), aflată în curs de examinare.

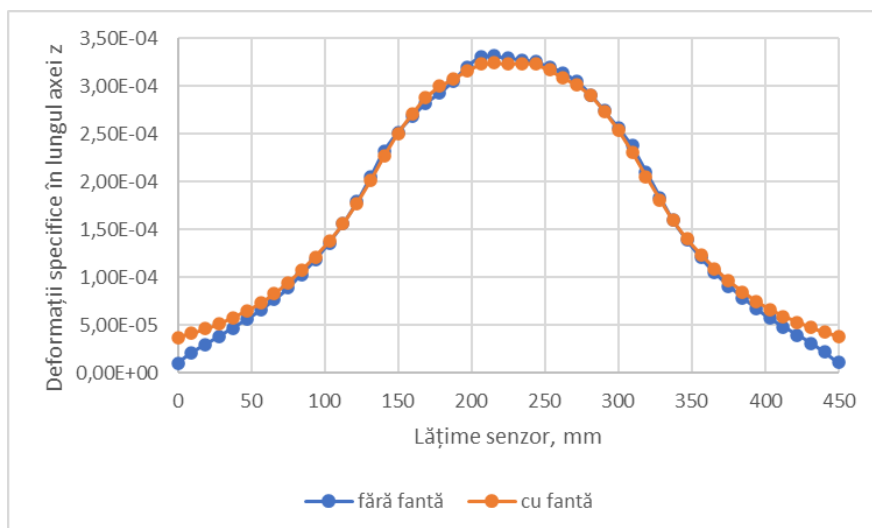


Fig. 3.9. Comparatii între modelele studiate de senzor WIM cu fantă și fără fantă pentru amplasarea forței pe mijlocul senzorului (lățime senzor)

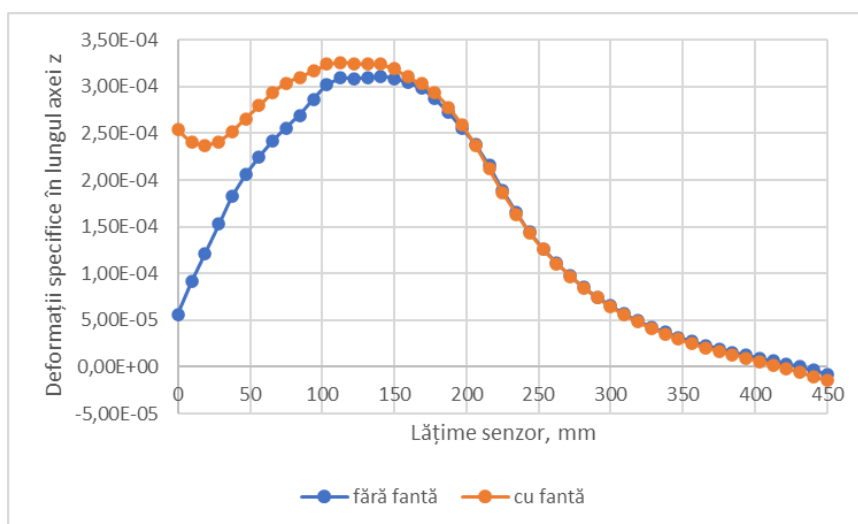


Fig. 3.10. Comparatii între modelele studiate de senzor WIM cu fantă și fără fantă pentru amplasarea forței deplasată la 100 mm în lungul axei x (lățime senzor)

3.5 ESTIMAREA ANDURANȚEI SENZORULUI

Din AEF prezentate mai sus rezultă că senzorul realizat în cadrul tezei ar rezista la 338.535 de traversări, până când începe cedarea prin oboseală. Din datele extrase din Tabelul 3.2 s-a estimat un număr de 32.120 punți autovehicule grele/an, în condițiile traficului urban monitorizat. Rezultă că senzorul WIM instalat în acest trafic ar rezista timp de $338535/32120=10,54$ ani.

Această estimare s-a facut pentru condițiile cele mai nefavorabile de încărcare, cu forța maximă aplicată în centrul senzorului. Ținând cont că în traficul real condițiile de funcționare sunt mai favorabile, rezultă că senzorul va rezista practic la un număr sensibil mai mare de cicluri.

CAPITOLUL 4: CERCETĂRI EXPERIMENTALE ÎN LABORATOR

4.1 SENZOR CU SENSIBILITATE RIDICATĂ, PENTRU CÂNTĂRIREA AUTOVEHICULELOR DIN TRAFICUL URBAN

4.1.1 DESCRIEREA SENZORULUI

În cererea de brevet RO 135230 A2/2020, Donțu A., Danila N., Andrusca L., Bârsănescu P.D. „Senzor pentru cântărirea autovehiculelor aflate în mișcare și monitorizarea traficului urban”, este descris un senzor suprateran pentru cântărirea autovehiculelor din traficul urban, care are dimensiunile și forma unui limitator de viteză. Acesta prezintă dezavantajul că elementul elastic, de forma unui înveliș cilindric, este sudat pe tot conturul său și astfel sensibilitatea sa este scăzută la capete, unde se îmbină cu capacele laterale.

Modificarea senzorului realizat în cadrul tezei constă în teșirea capacelor laterale acestora în partea superioară, astfel încât învelitoarea cilindrică nu mai este sudată de capace pe toată lățimea. Spațiul rămas liber între capace și învelitoare este umplut cu o garnitură de cauciuc, pentru a asigura etanșarea.

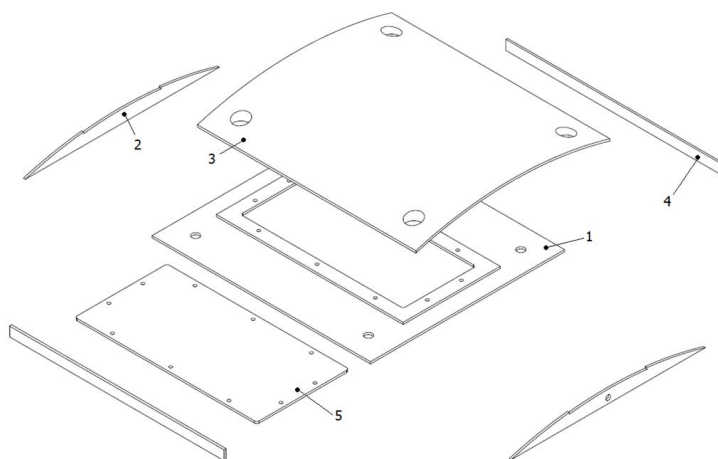


Fig. 4.1. Senzorul modificat - ansamblul 3D „explodat”

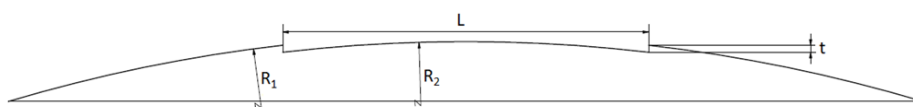


Fig. 4.2. Vedere 3D a subansamblului placa de bază, cu capacele laterale sudate și elementul elastic îndepărtat

Senzorul suprateran, Fig. 4.3, pentru cântărirea autovehiculelor în mișcare din traficul urban, care imită un limitator de viteză, a fost modificat în scopul creșterii sensibilității în zonele celor

două capace laterale 2, care sunt teșite în partea superioară pe o lungime L și adâncime t , astfel încât învelitoarea cilindrică 3 nu mai este în contact și nu mai este sudată de capace pe lungimea L , iar fanta F rămasă liberă între capace și învelitoare este umplută cu o garnitură de cauciuc (nefigurată în desene), pentru a asigura etanșarea incintei senzorului.

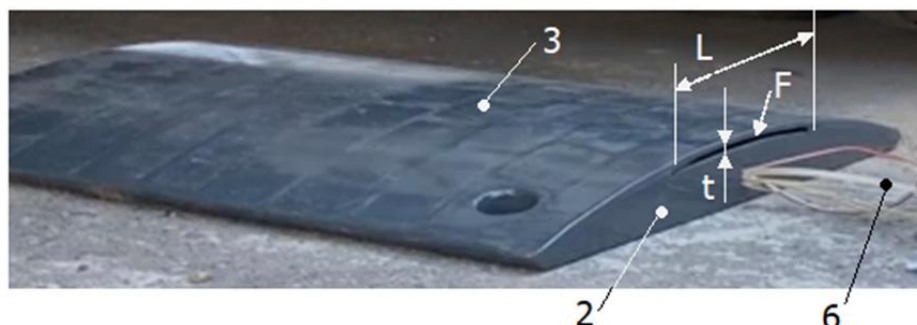


Fig. 4.3. Elementele componente ale senzorului modificat

4.1.2 MATERIALE

Senzorul de viteză a fost asamblat din componente din tablă de oțel, având o grosime de 4 mm, care au fost îmbinate nedemotabil (sudate prin arc cu flux). Avantajele acestei structuri metalice sunt: cost relativ scăzut, rezistență bună împotriva coroziunii și a factorilor externi de mediu, fabricare ușoară, reciclarea facilă a materialelor utilizate, precum și rezistența, durabilitatea și ușurința de reparare sau înlocuire la un cost redus. Pentru senzorii WIM comerciali se utilizează oțeluri inoxidabile, care rezistă mai bine la condițiile de mediu, dar acestea sunt scumpe.

Detaliile privind proprietățile fizice și mecanice ale tablei de oțel utilizată la confecționarea senzorului sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Proprietăți fizice și mecanice ale tablei de oțel utilizate la fabricarea senzorului (International Organization for Standardization, 1995)

Material	Limita de curgere σ_c [MPa]	Limita de rupere σ_r [MPa]	Alungirea la rupere A_r %	Modulul de elasticitate E [MPa]	Coeficientul Poisson ν	Densitate ρ [kg/m ³]
Oțel E390	390	530	18	$2 \cdot 10^5$	0,3	7850

4.1.2.1 ÎNCERCAREA LA TRACȚIUNE A OȚELULUI

Epruvete utilizate

Încercările la tracțiune au fost realizate conform cerințelor standardului ("ISO 6892-1 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature," 2019). Pentru aceste încercări s-a folosit pulsatorul INSTRON 8801 (cu specificațiile menționate în capitolul 2, Fig. 2.1), echipat cu software-ul BlueHill, conceput pentru testele la încărcări statice. Epruvetele pentru testare, conform configurației descrise în standardul ("ISO 6892-1 Metallic materials —

Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature," 2019), au fost prelevate dintr-o placă de oțel cu o grosime de 4 mm.

Epruvetele fabricate în vederea realizării solicitării la tracțiune statică, au fost următoarele: două probe care au fost solicitate până la rupere și două probe pe care au fost lipite mărci tensometrice în vederea determinării modulului de elasticitate longitudinală și a coeficientului Poisson.

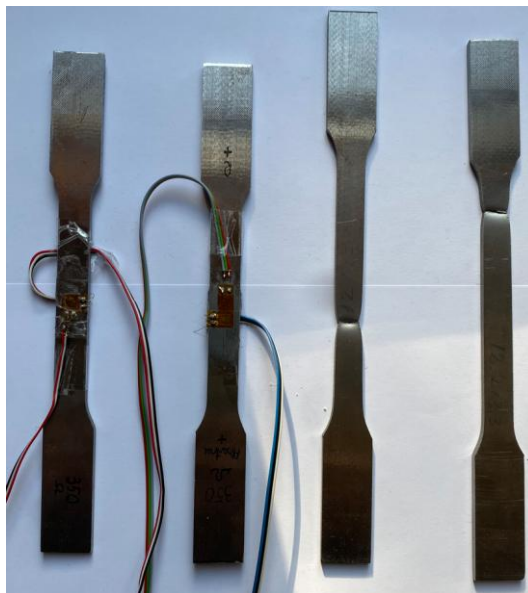


Fig. 4.4. Probele utilizate la încercare la tracțiune, cu mărci tensometrice lipite pe ele stânga (proba 1 și 2), și cele două probe încercate până la rupere dreapta (proba 3 și 4)

4.1.2.2 **MAȘINI ȘI DISPOZITIVE UTILIZATE**

Încercările la tracțiune au fost realizate pe mașina universală de încercat de tip INSTRON 8801, așa cum este prezentat în Fig. 2.1, utilizând softul BlueHill, specializat în teste la solicitări statice. Pentru a obține o estimare cât mai precisă a modulului de elasticitate longitudinală, fiecare epruvetă a fost echipată cu un extensometru de tip „Dynamic Extensometer – 2620-601”, furnizat de INSTRON.

Viteza de testare a fost de 2 mm/min, iar mașina de testare a înregistrat datele la o rată de achiziție de 1 secunde. Pentru fiecare probă, s-au măsurat dimensiunile secțiunii transversale în două direcții perpendiculare, iar media acestora a fost luată în considerare. De asemenea, s-a măsurat lungimea porțiunii dintre capetele de prindere pentru a determina alungirea.

4.1.2.3 **INCERCAREA LA TRACȚIUNE STATICA**

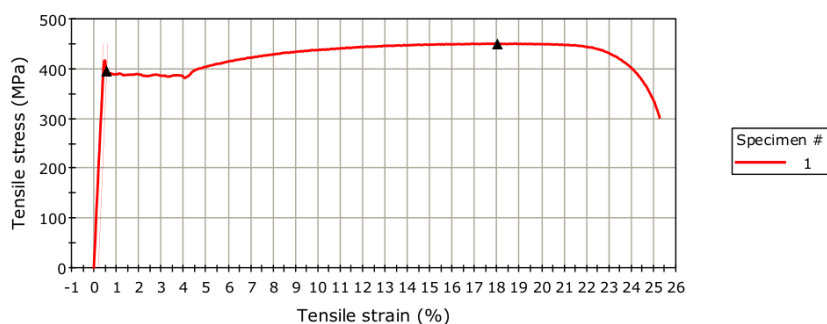
Analiza include curbele caracteristice și valorile tabelare obținute de la mașina de încercat. Încercarea la tracțiune a fost realizată pentru a identifica anumite caracteristici distinctive ale materialului, date care pot fi extrase exclusiv prin aceste încercări. Tabelele furnizate de mașina de

încercat includ informații specifice pentru fiecare probă, cum ar fi rezistența la tracțiune, alungirea la rupere, alungirea la rupere precum și alți parametri relevanți.

Observațiile principale referitoare la caracteristicile mecanice sunt următoarele:

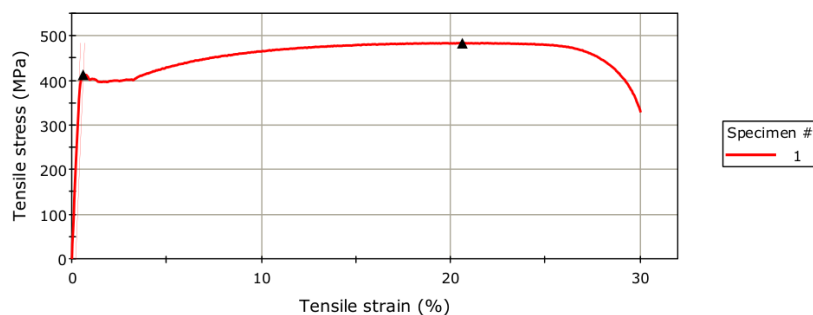
- Limitele de curgere sunt apropiate între cele două probe, înregistrându-se 395,52 MPa pentru prima probă și 412,53 MPa pentru cea de-a doua;
- Valorile rezistenței la tracțiune sunt mai puțin apropiate pentru ambele probe: 449,64 MPa pentru prima probă și 483,26 MPa pentru cea de-a doua.

Se evidențiază astfel faptul că valorile obținute din încercările la tracțiune efectuate se încadrează în specificațiile din standard, pentru oțelul utilizat. Media limitelor de curgere (offset 0,2%) și a rezistenței la rupere se situează în apropierea valorilor standard, indicând o concordanță semnificativă între rezultatele testelor și valorile de referință.



	Modulus (Automatic Young's) (MPa)	Load at Yield (Offset 0.2 %) (N)	Displacement (Strain 1) at Yield (Offset 0.2 %) (mm)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)
1	107883.17175	15662.75747	0.01514	395.52417
	Tensile strain at Yield (Offset 0.2 %) (mm/mm)	Extension at Yield (Offset 0.2 %) (mm)	Extension at Tensile Strength (mm)	Load at Tensile Strength (N)
1	0.00567	0.45381	14.39378	17805.61209
	Tensile strain at Tensile Strength (mm/mm)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)	Diameter (mm)	Load at Break (Standard) (N)
1	0.17992	449.63666		11889.55307
	Tensile extension at Break (Standard) (mm)	Tensile strain at Break (Standard) (mm/mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Energy at Break (Standard) (J)
1	20.19468	0.25243	300.24124	337.69079
	Area (mm^2)	Geometry	Length (mm)	Thickness (mm)
1	39.60000	Rectangular	80.00000	3.30000
	Width (mm)			
1	12.00000			

Fig. 4.5. Diagrama caracteristică și datele experimentale obținute pentru încercarea la tracțiune pentru prima probă solicitată până la rupere

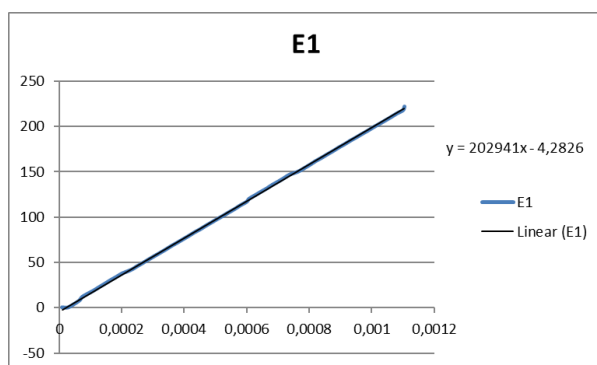


	Modulus (Automatic Young's) (MPa)	Load at Yield (Offset 0.2 %) (N)	Displacement (Strain 1) at Yield (Offset 0.2 %) (mm)	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)
1	103790.51506	15973.18643	0.00024	412.53063
	Tensile strain at Yield (Offset 0.2 %) (mm/mm)	Extension at Yield (Offset 0.2 %) (mm)	Extension at Tensile Strength (mm)	Load at Tensile Strength (N)
1	0.00593	0.47456	16.47326	18711.76958
	Tensile strain at Tensile Strength (mm/mm)	Tensile stress at Tensile Strength (MPa)	Diameter (mm)	Load at Break (Standard) (N)
1	0.20592	483.25851		12725.52013
	Tensile extension at Break (Standard) (mm)	Tensile strain at Break (Standard) (mm/mm)	Tensile stress at Break (Standard) (MPa)	Energy at Break (Standard) (J)
1	23.99799	0.29997	328.65497	421.19280
	Area (mm ²)	Geometry	Length (mm)	Thickness (mm)
1	38.72000	Rectangular	80.00000	3.20000
	Width (mm)			
1	12.10000			

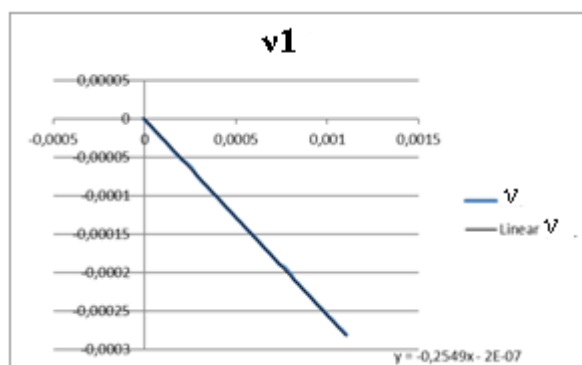
Fig. 4.6. Diagrama caracteristică și datele experimentale obținute pentru încercarea la tracțiune pentru a doua probă solicitată până la rupere

4.1.2.4 DETERMINAREA MODULULUI DE ELASTICITATE ȘI A COEFICIENTULUI POISSON

În Fig. 4.4 sunt prezentate probele încercate la tracțiune. Pe fiecare s-au montat câte două mărci tensometrice dispuse în T, în vederea determinării deformațiilor specifice longitudinale și transversale. În aceeași figură se prezintă modul de amplasare a mărcilor pe direcție longitudinală și transversală de la care se vor prelua semnalele privind deformațiile specifice corespunzătoare.



(a)



(b)

Fig. 4.7. Determinarea modului de elasticitate longitudinală (a) și a coeficientului Poisson (b) pentru proba 1: $E_1 = 2,03 \cdot 10^5 \text{ MPa}$; $\nu = 0,255$

În Fig. 4.7a se observă graficul de variație a tensiunii normale în funcție de deformația specifică longitudinală pentru prima probă și acest grafic se apropie de o linie dreaptă. Panta acestei

drepte reprezintă modulul de elasticitate longitudinală, care are valoarea de aproximativ 202941MPa.

În Fig. 4.7b graficul de variație a deformației specifice longitudinale în raport cu deformația specifică transversală pentru prima probă se apropie de o linie dreaptă. Panta acestei drepte linii reprezintă coeficientul Poisson, care este aproximativ 0,255.

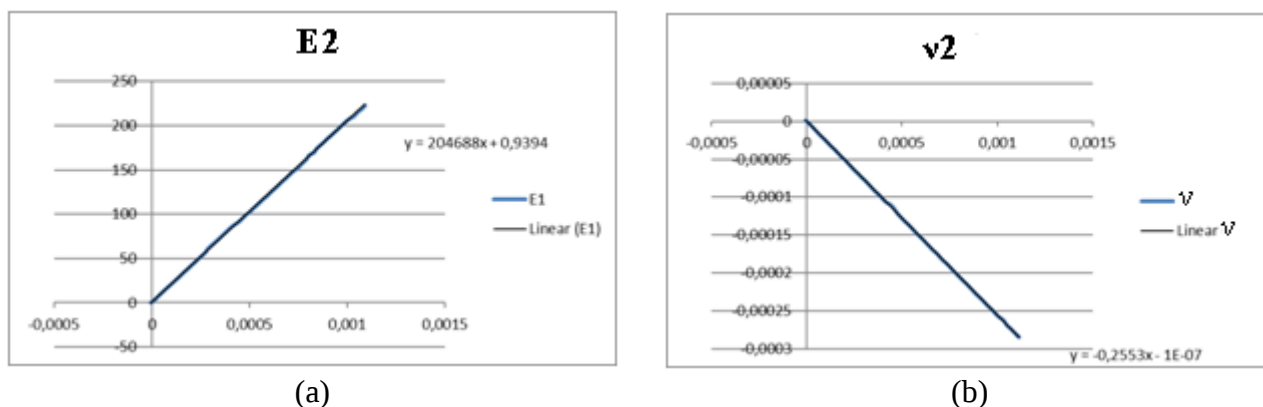


Fig. 4.8. Determinarea modulului de elasticitate longitudinală (a) și a coeficientului Poisson (b) pentru proba 2: $E = 2,05 \cdot 10^5 \text{MPa}$; $\nu = 0,255$

În Fig. 4.8a se prezintă graficul tensiunii normale funcție de deformația specifică longitudinală pentru proba a doua, graficul se apropie de o linie dreaptă. Panta acestei drepte reprezintă modulul de elasticitate longitudinală, cu o valoare de aproximativ 204688 MPa, citită din grafic. Valoarea modulului de elasticitate indicata automat de masina de incercat, utilizand deplasarea traversei masinii, nu este considerata suficient de precisa si din acest motiv s-au efectuat aceste incercari.

În Fig. 4.8b se prezintă graficul de deformație specifică longitudinală în raport cu deformația specifică transversală proba a doua care se apropie de o linie dreaptă. Panta acestei drepte reprezintă coeficientul Poisson, care este de 0,255.

Observațiile principale sunt următoarele:

- Valorile modulului de elasticitate longitudinală E sunt foarte apropiate pentru ambele probe: aproximativ $E_1 = 202941 \text{ MPa}$ pentru prima probă și $E_2 = 204688 \text{ MPa}$ pentru cea de-a doua, media determinarilor fiind $E = 203812,5 \text{ MPa}$;
- Coeficientul Poisson pentru ambele probe este același, $\nu = 0,255$.

Se observă că rezultatele obținute din testele efectuate sunt în mare măsură conforme cu specificațiile referitoare la oțel și sunt foarte apropiate una de cealaltă. Cu toate acestea, media valorilor pentru coeficientul Poisson diferă puțin fata de cele indicate uzual pentru oțel.

Aceste caracteristici elastice determinate experimental au fost utilizate în analiza cu elemente finite (AEF).

4.1.3 LIPIREA ROZETELOR TENSOMETRICE

O altă modificare a senzorului realizat în cadrul tezei față de cel prezentat în cererea de brevet RO 135230 A2/2020 o reprezintă utilizarea unor rozete tensometrice tip T, în locul mărcilor

tensometrice unidirectionale. Trei rozete au fost lipite pe partea interioară (concavă) a elementului elastic. Fiecare rozetă a fost cuplată în semipunte. Avantajele acestei modificări sunt următoarele:

- Crește sensibilitatea senzorului, datorită cumulării semnalului cules pe două direcții;
- Se micșorează erorile determinate de variațiile de temperatură, fără a fi necesare mărci tensometrice de compensare suplimentare.

În total au fost lipite trei rozete, *Fig. 4.9*: rozeta 1 a fost montată la distanța de 113 mm de capătul lateral din stânga, rozeta 2 a fost montată la centru și rozeta 3 la 113 mm de capătul lateral dreapta.

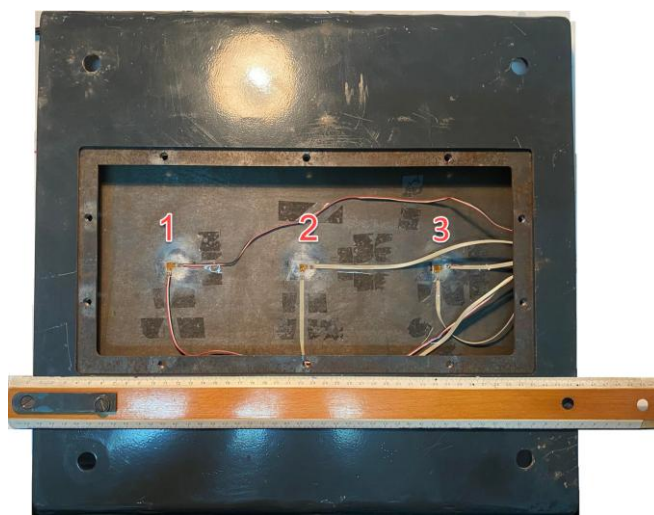


Fig. 4.9. Rozete tensometrice lipite pe partea concavă a elementului elastic

Rozetele tip T sunt utilizate pentru determinarea stării plane de tensiuni în cazul în care se cunosc direcțiile principale. De asemenea, cu ele se poate determina coeficientul de contracție transversală (în starea axială de tensiuni), iar în cazul în care grilele sunt legate în semipunte, semnalul de ieșire este proporțional cu suma semnalelor pe cele două direcții. Deformațiile specifice ε_1 și ε_2 se măsoară cu ajutorul unor celor două grile ale rozetelor tensometrice. Deformațiile specifice dezvoltate în urma sarcinii aplicate de mașina de încercat, sunt citite pe ecranul punții tensometrice și sunt înregistrate.

Rozetele alese au fost cu două grile perpendiculare de tip T, model 032WT (*Fig. 4.10*), produse de firma Vishay, sub denumirea produsului CEA-06-032WT-120, destinate pentru materialele de tip oțel, oțel turnat, materiale compozite și PCB.

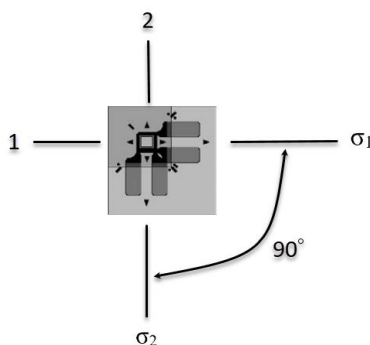


Fig. 4.10. Rozeta Vishay de tip T, model 032WT, cu două grile perpendiculare suprapuse

4.2 ETALONAREA STATICĂ A SENZORULUI

4.2.1 ECHIPAMENTE UTILIZATE ȘI PROGRAMUL DE INCERCARI

Încercările privind etalonarea mărcilor tensometrice, lipite pe suprafața interioară a elementului de rulare, au fost efectuate utilizând pulsatorul de tip Instron 8801, Fig. 4.11, destinat încercărilor la solicitări statice. Forța de compresiune a fost aplicată cu ajutorul unui poanson cilindric montat în bacurile superioare ale mașinii.

Au fost efectuate încercări cu forța aplicată pe partea convexă a elementului elastic, în cele trei secțiuni care trec prin centrul rozetelor tensometrice, care sunt amplasate la pe partea concavă a elementului elastic (la interiorul senzorului).

S-au măsurat semnalele de ieșire atât pentru fiecare grilă cuplată în sfert de punte, cât și pentru grilele fiecărei rozete cuplate în semipunte



Fig. 4.11. Pulsatorul Instron 8801(mijloc), PC-ul pulsatorului (dreapta), puntea tensometrică Vishay P3 (în spatele laptopului) și achiziția datelor cu ajutorul laptopului (stânga)

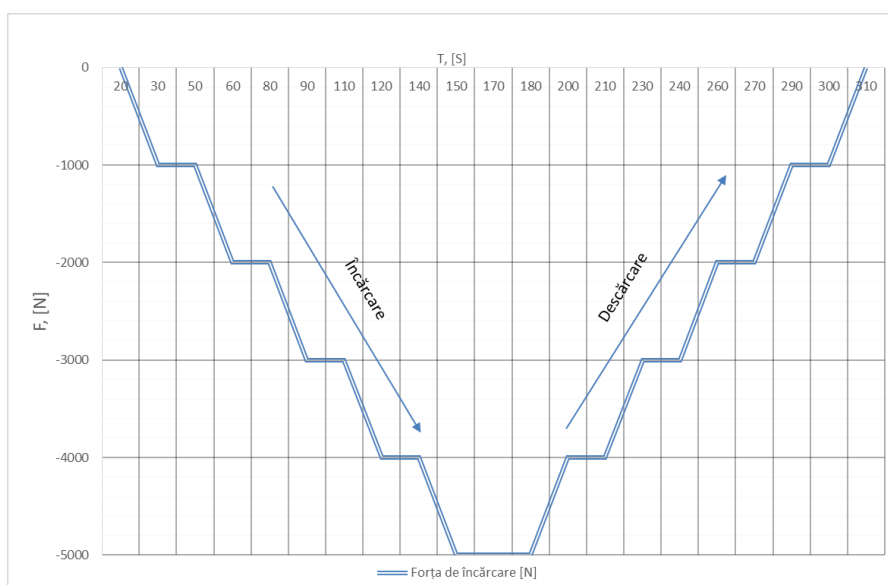


Fig. 4.12. Diagrama de încărcare/descărcare a senzorului (compresiune)

CAPITOLUL 5: TESTAREA SENZORULUI ÎN CONDIȚII REALE DE INCARCARE

5.1 CÂNTĂRIREA AUTOVEHICULELOR

Pentru testele în teren s-au utilizat doi senzori, dintre care doar pe unul au fost lipite rozete tensometrice, *Fig. 5.2* și *Fig. 5.3* (senzorul din stânga). Cei doi senzori au fost montați cu dibluri în asfalt, astfel încât roțile de pe o punte să calce simultan pe cei doi senzori. S-a ales această soluție pentru ca roțile de pe o punte să fie la același nivel atunci când traversează senzorii, ceea ce corespunde situației din trafic, când linia de senzori traversează strada.

Semnalul de la rozetele tensometrice montate au fost preluate de către o punte tensometrică Vishay P3 și achiziționate pe un laptop, *Fig. 5.1*.

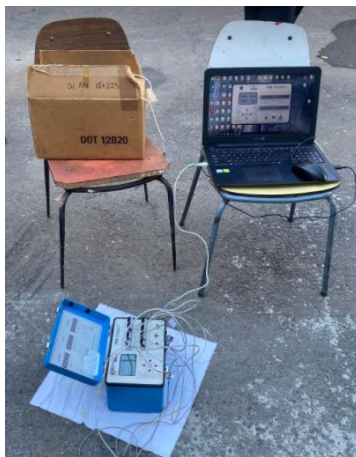


Fig. 5.1. Echipamente utilizate

Procedura de testare a fost următoarea:

- s-au făcut trei traversări complete peste senzori cu autoturismul Fiat Panda, cu o viteză de maximum 5 km/h, *Fig. 5.2*;
- s-au făcut două traversări complete peste senzori cu autocamionul DAF LF, cu o viteză de maximum 5 km/h, *Fig. 5.3*;
- s-au făcut două traversări complete peste senzori cu autoturismul model Volkswagen Touareg, cu o viteză de maximum 5 km/h și trei încercări statice a roții din față cu preluarea dimensiunilor amprentelor de pe suprafața carosabilului și a senzorului, *Fig. 5.4*.



Fig. 5.2. Traversarea senzorilor cu autoturismul Fiat Panda



Fig. 5.3. Traversarea senzorilor cu autocamionului DAF LF

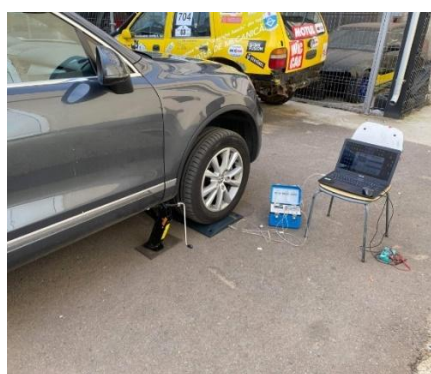


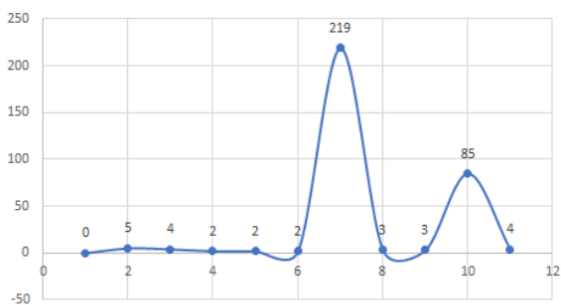
Fig. 5.4. Traversarea senzorilor cu autoturismul model Volkswagen Touareg si încarcarea-descarcarea statică repetată, cu ajutorul cricului

În total s-au facut urmatoarele traversări ale roților autovehiculelor de mai sus peste senzori:

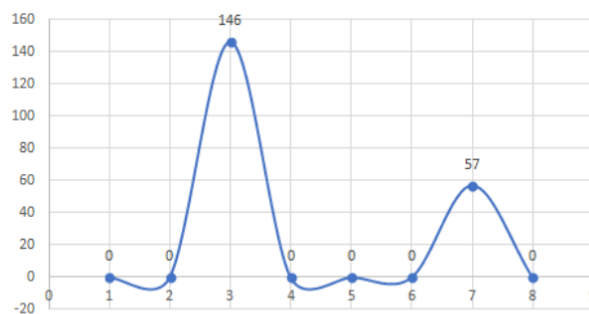
- 3 traversări cu roata din față și 3 traversări cu roata din spate a autoturismului Fiat Panda, atât pentru situația când roata este amplasată pe mijlocul sensorului, cât și deplasată spre stânga;
- 2 traversări cu roata din față si 2 traversări cu roata din spate a autotcamionului DAF LF, pentru situația când roata este amplasată pe mijlocul sensorului;
- 2 traversări cu roata din față față si 2 traversări cu roata din spate a autoturismului Volkswagen Touareg, pentru situația când roata este amplasată pe mijlocul sensorului

5.1.1 REZULTATELE OBȚINUTE ÎN URMA TESTELOR

Fiecare dintre aceste TER de tip T a fost legată la puntea Vishay, echilibrarea lor făcându-se înainte de traversarea roții peste senzor pentru fiecare marcă în parte. În timpul testelor s-a achiziționat datele pe laptop, și anume: data; frecvența de achiziție (o secundă); deformațiile specifice în trei canale: Ch1, Ch2 și Ch3 ce corespund rozetelor TER 1, TER2 și TER3. Fiecare rozetă are cele două grile legate în serie.



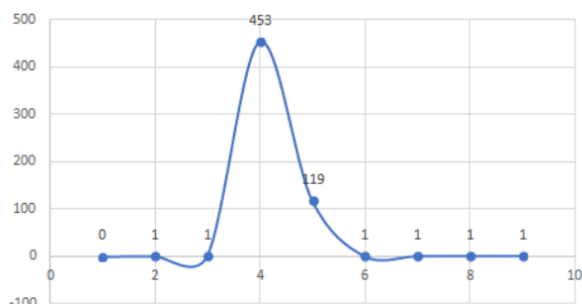
a)



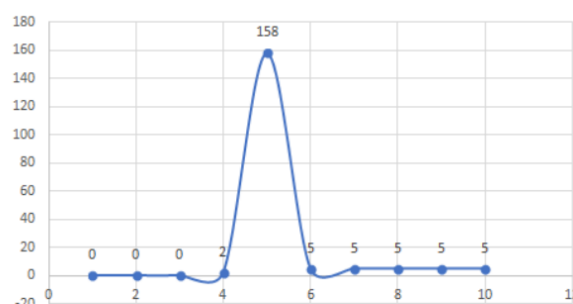
b)

Fig. 5.5. Semnalul de ieșire al rozetei TER2 în funcție de timp, în momentul în care senzorul WIM este traversat de autoturismul Fiat Panda

Se observă că pentru toate rozetele semnalele de ieșire pornesc de la valori apropiate de zero (obținute la calibrarea punții) și revin la valori apropiate de zero după traversarea roții de autoturism peste senzor. Acest fapt arată că tensiunile dezvoltate în elementul elastic al senzorului sunt sub limita de elasticitate a materialului, ceea ce denotă că sistemul proiectat prezintă un răspuns liniar-elastic în condițiile de încărcare de mai sus.



a)



b)

Fig. 5.6. Semnalul de ieșire al rozetei TER2 în funcție de timp, atunci când senzorul WIM este traversat de camionul DAF LF cu cele două roți (a, b)

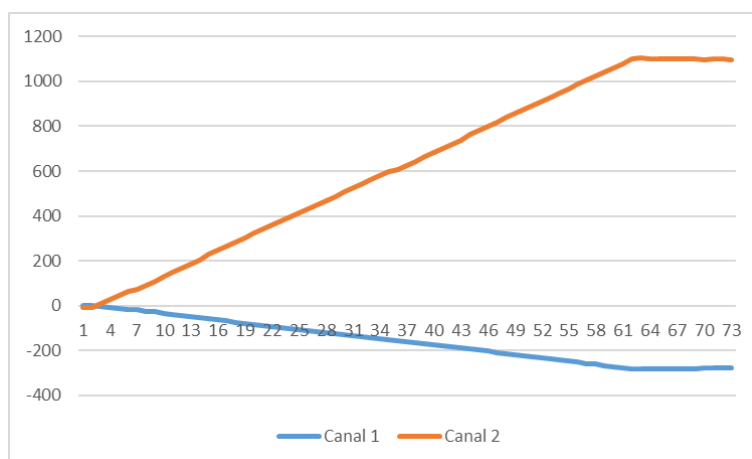


Fig. 5.7. Semnalul de ieșire al rozetei în funcție de timp, atunci când senzorul WIM este încărcat static de roata din față a autoturismului Volkswagen Touareg

În **Error! Reference source not found.** și Fig. 5.8 se prezintă măsurarea dimensiunilor ariei de contact a roții din față a autoturismului Volkswagen Touareg, care încarcă elementul elastic al senzorului sau suprafața plană a carosabilului.

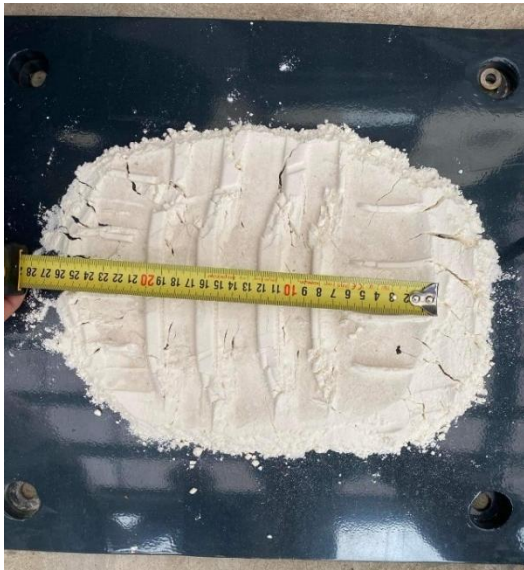


Fig. 5.8. Aria petei de contact obținută pe elementul elastic



Fig. 5.9. Aria petei de contact obținută pe carosabil

CAPITOLUL 6: ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A MODELULUI PROPUȘ ȘI VALIDAREA ACESTUIA

6.1 MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A ETALONĂRII STATICE

Pentru modelarea numerică a etalonării statice a senzorului, solicitat cu o forță concentrată în diverse puncte, s-au efectuat o serie de calcule a modelului 3D cu elemente finite pentru a determina distribuția de tensiuni și deformații. Simulările s-au efectuat în mediul programului cu elemente finite Ansys Mechanical.

Modele 3D ale senzorului și poansonului semicilindric au fost realizate în mediul programului SpaceClaim, Fig. 6.1.

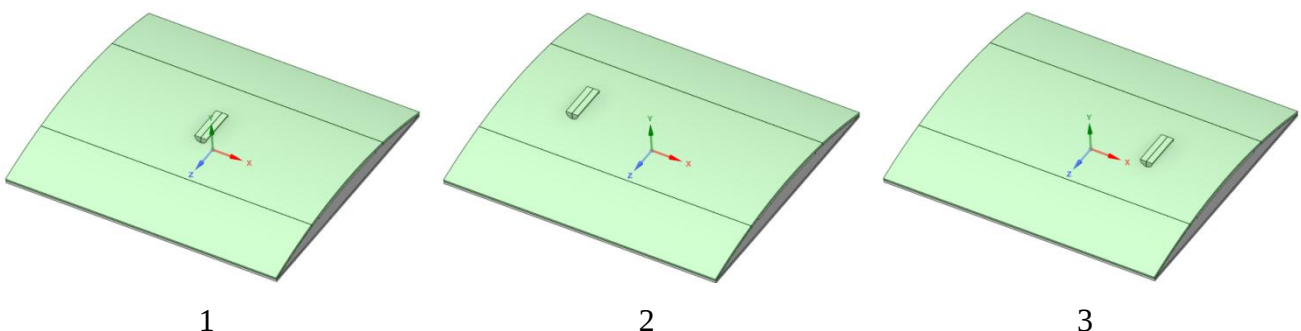


Fig. 6.1. Modelele geometrice de încărcare utilizate în scenariile MEF, notate cu 1, 2 și 3

Modelele geometrice au fost importante în programul AEF, supusă analizei statică-structurală. S-au impus proprietățile elastice pentru senzorul de viteză, care sunt prezentate în **Error! Reference source not found.** S-a impus proprietățile mecanice a contactului, cu coeficient de frecare 0,1, formulizarea Augmented Lagrange, suprafața țintă a fost aleasă suprafața cilindrică și suprafața contact a fost aleasă suprafața senzorului de viteză.

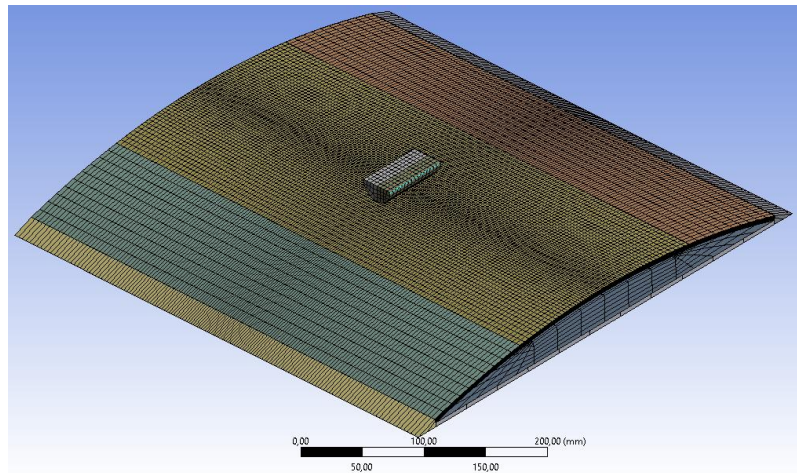


Fig. 6.2. Modelul discretizat al senzorului WIM, care imită un senzor de viteză

Schema de rezemare și încărcare a elementului elastic în formă de învelitoare semicilindrică este prezentată în Fig. 6.3, unde este aplicată o forță de 5000 N, printr-un poanson semicilindric. Suprafeței elastice pe care se așează senzorul îi sunt impuse restricțiile de deplasare în lungul axelor (DX=liber; DY=0; DZ=liber).

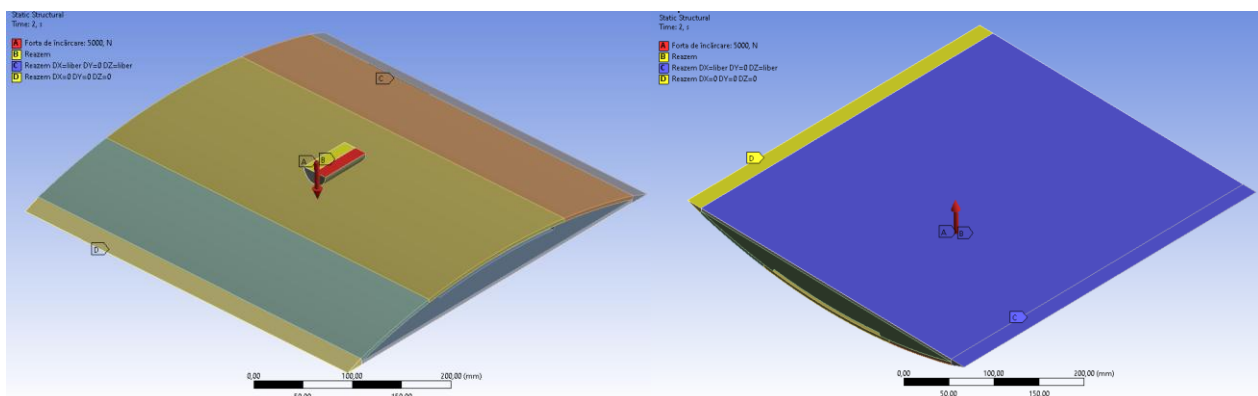


Fig. 6.3. Schema de rezemare și încărcare

6.2 MODELAREA NUMERICĂ A SENZORULUI

Pentru prezicerea comportamentului senzorului WIM la traversarea sa cu roata (în condiții reale), s-au dezvoltat o serie de modele analizate cu ajutorul metodei cu elemente finite. În total au fost modelate opt scenarii, așa cum au reeșit din experimente.

Scenariile modelate au fost următoarele:

1. Traversarea roții din față a automobilului Fiat Panda pe zona centrală a senzorului;
2. Traversarea roții din spate a automobilului Fiat Panda pe zona centrală a senzorului;
3. Traversarea roții din față a automobilului Fiat Panda pe zona decalată la 50mm spre stânga de zona centrală a senzorului;
4. Traversarea roții din spate a automobilului Fiat Panda pe zona decalată la 50mm spre stânga de zona centrală a senzorului;
5. Traversarea roții din față a autocamionului DAF LF pe zona centrală a senzorului;
6. Traversarea roții din spate a autocamionului DAF LF pe zona centrală a senzorului;
7. Traversarea roții din față a autoturismului Volkswagen Touareg pe zona centrală a senzorului;
8. Traversarea roții din spate a autoturismului Volkswagen Touareg pe zona centrală a senzorului.

Calculul numeric efectuat și prezentat în cele ce urmează s-au concentrat asupra: determinării distribuției de tensiuni von Mises, tensiuni în lungul axelor x și z ; deformații specifice echivalente, deformații specifice în lungul axelor x și z .

Pentru a primi rezultate apropiate de cele înregistrate în condiții reale, s-a ținut cont de transferul sarcinilor de la roată la senzor. Pentru aceasta s-a creat modelul 3D al senzorului și modelele 3D ale pneurilor montate pe roți și umflate. Dimensiunile reale ale senzorului sunt prezentate în **Error! Reference source not found.** iar dimensiunile utilizate la modelarea roților sunt prezentate în **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found., Error! Reference source not found. și Error! Reference source not found..**

S-a modelat geometria 3D a ansamblului roților ținând cont de diametrul jantei, diametrul total a roții ($D = d + 2H$), înălțimea pneului (H) și lățimea suprafeței de rulare (B).

CAPITOLUL 7: MODELAREA NUMERICĂ A INTERACȚIUNII ROATĂ-SENZOR ÎN REGIM TRANZITORIU PRIN METODA ELEMENTELOR FINITE

7.1 INTRODUCERE

Sistemele de cântărire în mișcare sunt esențiale pentru monitorizarea sarcinilor vehiculelor în trafic, fără a perturba deplasarea acestora, contribuind astfel la protecția infrastructurii și la eficientizarea controlului rutier. Performanța unui sistem WIM este influențată în mod semnificativ de interacțiunea mecanică dintre roțile vehiculelor și senzorii integrați în carosabil.

În cadrul acestui capitol, se prezintă analiza numerică a unui senzor WIM destinat traficului urban, având forma și dimensiunile unui limitator de viteză, supus trecerii vehiculelor la viteze mici, utilizând metoda elementelor finite. Modelarea a fost realizată în ANSYS Workbench 2022 R2, modulul Transient Structural, pentru a surprinde comportamentul dinamic real al sistemului în timpul contactului roată-senzor.

Prin această abordare, se urmărește nu doar analiza comportamentului structural al senzorului, ci și evidențierea influenței dinamice a contactului asupra performanțelor generale ale sistemului de cântărire în mișcare.

7.2 MODELUL GEOMETRIC

Modelul geometric al ansamblului roată-senzor a fost realizat utilizând mediul de modelare tridimensională **SpaceClaim**, integrat în platforma ANSYS Workbench (Ansys, 2023).

Geometria a fost generată și este prezentată în Figura 7.2, care include:

- suprafețe care simulează asfaltul;
- senzorul propriu-zis, modelat conform configurației prezentată în Capitolul 3;
- suprafețele care modelează cauciucul;
- un disc suplimentar care simulează comportamentul jantei roții.

Modelul creat permite reproducerea fidelă a fenomenelor mecanice reale, cu asumarea de simplificări minore a unor componente din ansamblu.

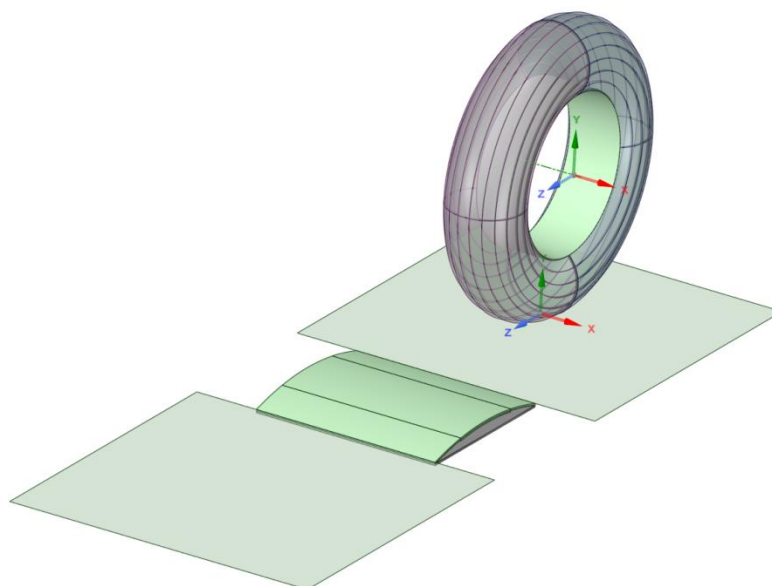


Fig. 7.1. Modelul geometric 3D utilizat în cadrul studiului dinamic

7.3 DISCRETIZAREA MODELULUI GEOMETRIC ÎN ELEMENTE FINITE

Modelul geometric realizat a fost importat în programul ANSYS Workbench pentru analiza tranzient-structurală.

Pentru simularea contactului dintre suprafețele modelului, au fost definite proprietăți mecanice specifice: **coeficient de frecare de 0,2**, utilizarea formulării **Nodal-Projected Normal From Contact** pentru algoritmul de contact, suprafața contact fiind selectată suprafața cilindrică, iar suprafața de țintă ca suprafața senzorului.

Modelul tridimensional al ansamblului a fost discretizat în:

- Elemente solide de tip **SOLID185** și **SOLID186**, cu 8, respectiv 20 de noduri;
- Elemente de tip **CONTA174** pentru suprafețele de contact;
- Elemente de tip **TARGET170** pentru suprafețele țintă;
- Elemente de tip **MASS21** pentru simularea maselor (încărcărilor);
- Elemente de tip **REINF265** pentru ranforsare structurală a cauciucului;
- Elemente de tip **HSFLD242** pentru modelarea câmpurilor hidrostatice de fluid, care permite modelarea gazului (aerului) cu presiunea corespunzătoare din interiorul roții.

În zona de interes maxim (contact roată-senzor), s-a utilizat o rafinare locală a rețelei, cu o dimensiune minimă a elementului de aproximativ 2 mm.

În urma procesului de discretizare, modelul 3D final conține **8.891 de elemente** și **39.655 de noduri**.

Modelul discretizat obținut este prezentat în Figura 7.3, pentru cazul în care roata încărcată cu greutatea corespunzătoare pe pe mijlocul senzorului, în dreptul poziției active.

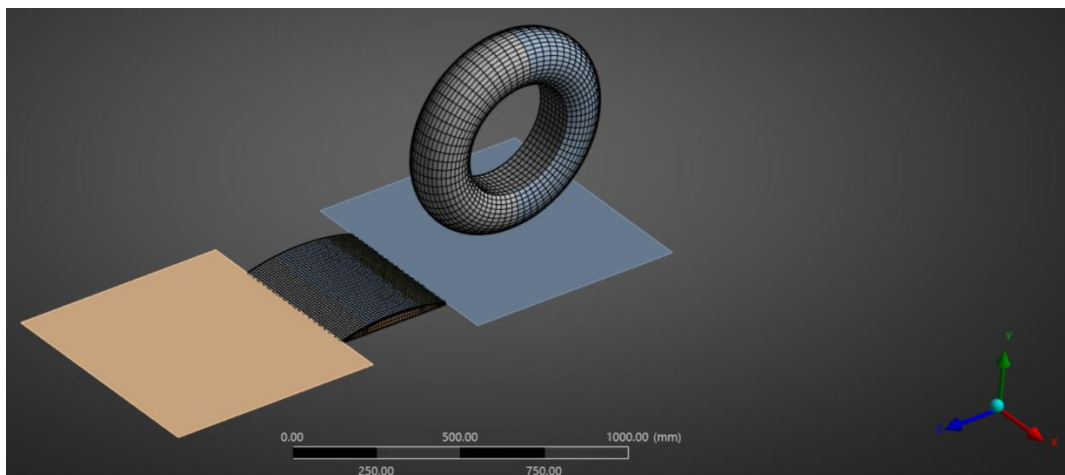


Fig. 7.2. Modelul discretizat al senzorului WIM, care imită un limitator de viteză

7.4 SCHEMA DE ÎNCĂRCARE/DESCĂRCARE

În cadrul analizei numerice, modul de rezemare și încărcare al modelului a fost configurat astfel încât să reproducă cât mai fidel condițiile reale de funcționare. Schema de încărcare/rezemare este prezentată în **Figura 7.4**.

Modul de rezemare:

Senzorul WIM a fost considerat fixat la bază, reprezentând o ancorare rigidă în infrastructura drumului. Condițiile de fixare impuse asupra senzorului au fost de tip **suport fix**, blocând toate gradele de libertate (translații și rotații) ale suprafeței de contact cu asfaltul.

Suprafețele reprezentând asfaltul au fost, de asemenea, fixate corespunzător pentru a preveni deplasările necontrolate în timpul aplicării sarcinilor dinamice.

Modul de aplicare a încărcărilor:

Încărcările au fost aplicate etapizat, pe parcursul a cinci pași de încărcare, după cum urmează:

- **Aplicarea sarcinii gravitaționale** asupra întregului ansamblu și stabilirea temperaturii de referință pentru gazul (aerul) care umple volumul interior al roții;
- **Aplicarea unei mase în centrul de masă al roții** de 350 kg, 700 kg și 1000 kg;
- **Umflarea anvelopei** până la o presiune internă de 2,5 bari;
- **Deplasarea pe verticală a roții** pentru a o așeza pe suprafața de drum;
- **Eliminarea condițiilor de frontieră** de deplasare și presiune pentru a permite o comportare liberă a roții în timpul rulării;
- **Aplicarea unei viteze impuse** asupra ansamblului pentru a simula rularea roții peste senzor. Vitezele au fost de 1,1 m/s; 1,6 m/s; 2 m/s și 3 m/s.

Primele patru etape de încărcare au fost realizate în regim **static** pentru a obține o distribuție de echilibru inițială corectă. Etapa a cincea, care presupune rularea peste senzor, a fost efectuată în regim **tranzitoriu**, pentru a analiza efectele de inerție și variațiile accelerației verticale asupra

sistemului. Această succesiune de condiționări și încărcări permite o simulare precisă a fenomenelor mecanice reale, contribuind la evaluarea corectă a comportamentului structural al senzorului WIM sub sarcini dinamice.

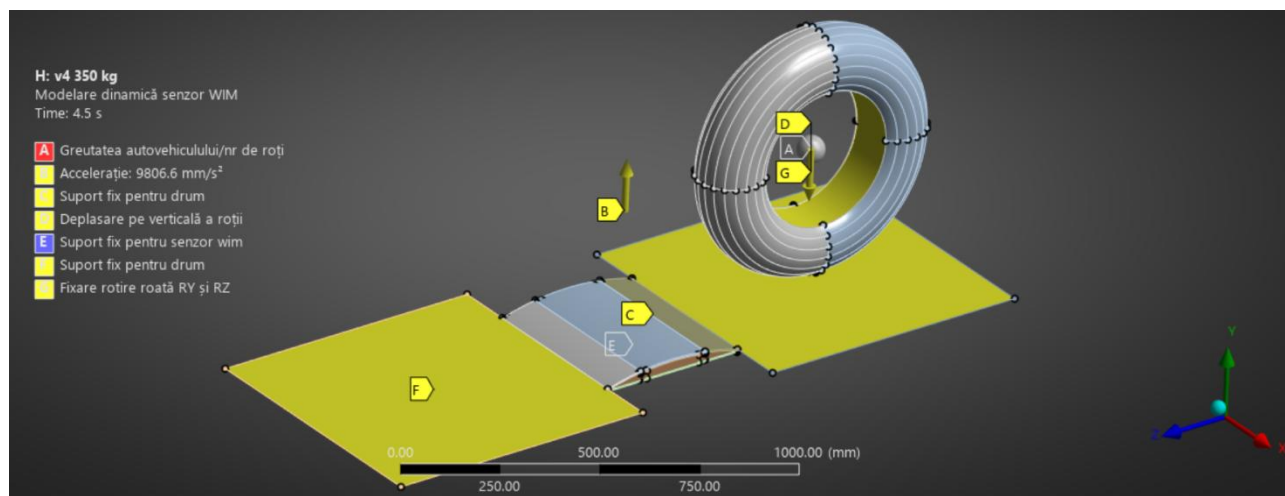


Fig. 7.3. Schema de încărcare/rezemare

7.5 REZULTATE OBȚINUTE

În prezentul subcapitol sunt prezentate rezultatele obținute în urma modelărilor numerice efectuate pentru șase scenarii. Aceste scenarii au implicat combinarea a trei valori distincte ale sarcinii verticale aplicate (încărcarea roții cu masa de 350 kg, 700 kg și 1000 kg) și patru viteze de deplasare (1,1 m/s, 1,6 m/s, 2 m/s și 3 m/s). Configurarea modelării numerice a fost realizată astfel încât, pentru viteza de 1,1 m/s, să fie comparate efectele celor trei niveluri de încărcare (350 kg, 700 kg și 1000 kg), iar pentru încărcare de 350 kg să fie evaluată influența creșterii vitezei asupra comportării ansamblului.

Ținând cont de faptul că senzorul analizat este conceput să funcționeze și ca un limitator de viteză, modelările au fost realizate exclusiv pentru viteze mici, evitând solicitările extreme ce ar putea depăși domeniul său de utilizare normală.

Pentru fiecare dintre scenariile studiate sunt prezentate deplasările totale ale ansamblului roată-senzor și ale senzorului în mod individual, viteza rezultantă la nivel global, distribuțiile tensiunilor echivalente von Mises, precum și statutul și presiunea de contact în zona de interacțiune dintre roată și senzor. Rezultatele oferă o perspectivă detaliată asupra răspunsului structural al modelului supus diferitelor condiții de încărcare și viteză.

7.5.1 SCENARIUL I: ÎNCĂRCARE CU 350KG PE ROATĂ

În această secțiune sunt prezentate rezultatele obținute pentru Scenariul I de încărcare, corespunzător aplicării unei încărcări cu o masă de 350 kg, la o viteză de deplasare de 1,1 m/s. Sunt ilustrate deformațiile totale ale modelului global și ale senzorului, viteza resultantă a modelului global, distribuția tensiunilor echivalente von Mises, statutul contactului roată-senzor și valorile presiunii de contact. Analiza evidențiază modul în care ansamblul răspunde solicitărilor în condiții de sarcină redusă și viteză mică.

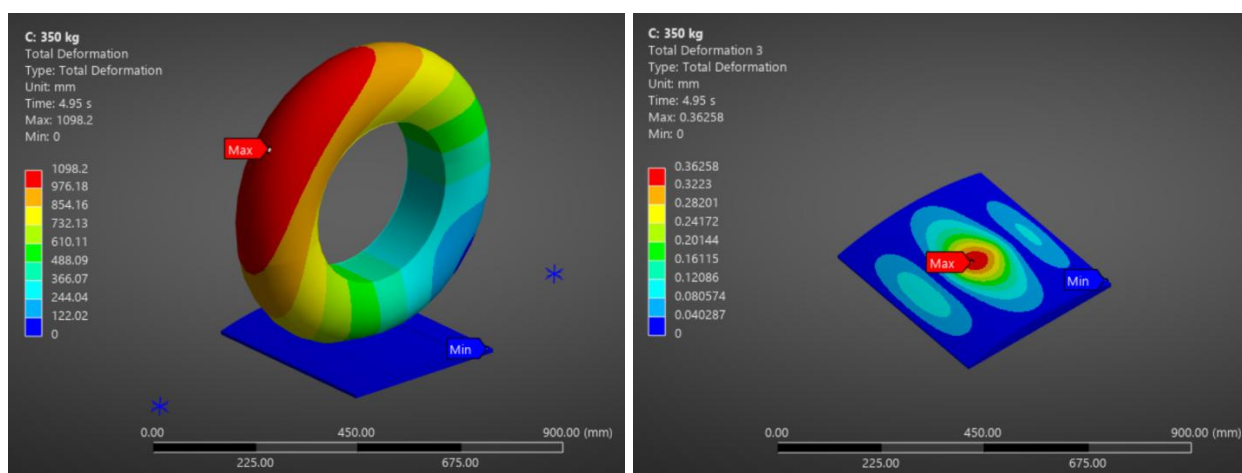


Fig. 7.4. Deplasări totale pe model global/senzor WIM – Scenariul I de încărcare

7.5.2 SCENARIUL II: ÎNCĂRCARE CU 700KG PE ROATĂ

Scenariul II analizează comportamentul modelului pentru încărcarea roții cu masa de 700kg, aplicată la o viteză de 1,1 m/s. Sunt prezentate rezultatele privind deformațiile totale ale ansamblului și ale senzorului, variația vitezei de deplasare la nivel global, precum și distribuția tensiunilor echivalente von Mises. De asemenea, este evidențiată starea de contact dintre roată și senzor, împreună cu distribuția presiunii de contact.

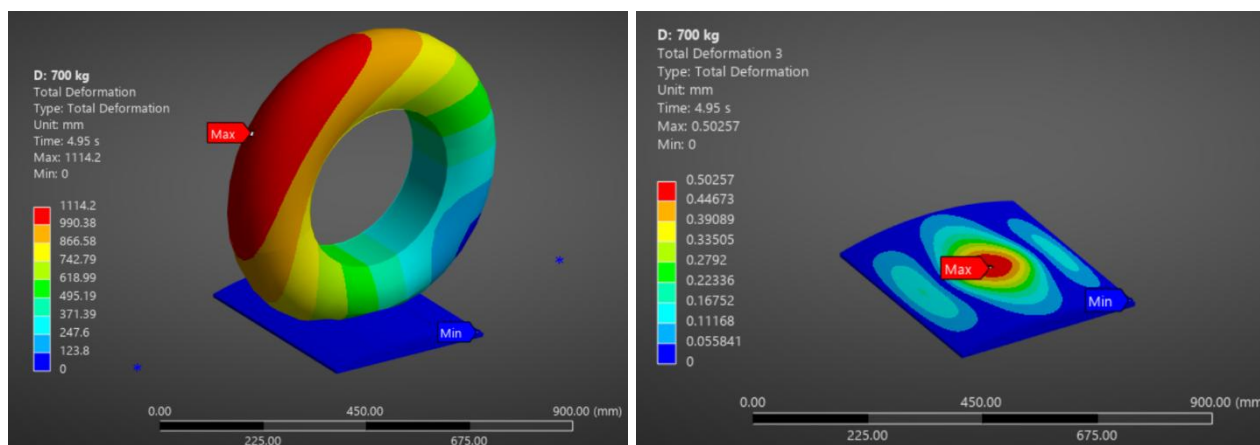


Fig. 7.5. Deplasări totale pe model global/senzor WIM – Scenariul II de încărcare

7.5.3 SCENARIUL III: ÎNCĂRCARE CU 1000KG PE ROATĂ

Pentru Scenariul III este analizat răspunsul structural sub acțiunea unei încărcări a roții cu masa de 1000 kg, la viteza de 1,1 m/s. Rezultatele includ deformațiile totale ale modelului global și ale senzorului, viteza rezultantă a ansamblului, distribuția tensiunilor echivalente von Mises, precum și analiza contactului roată-senzor și a presiunii de contact. Se observă o creștere a solicitărilor mecanice datorată amplificării sarcinii aplicate.

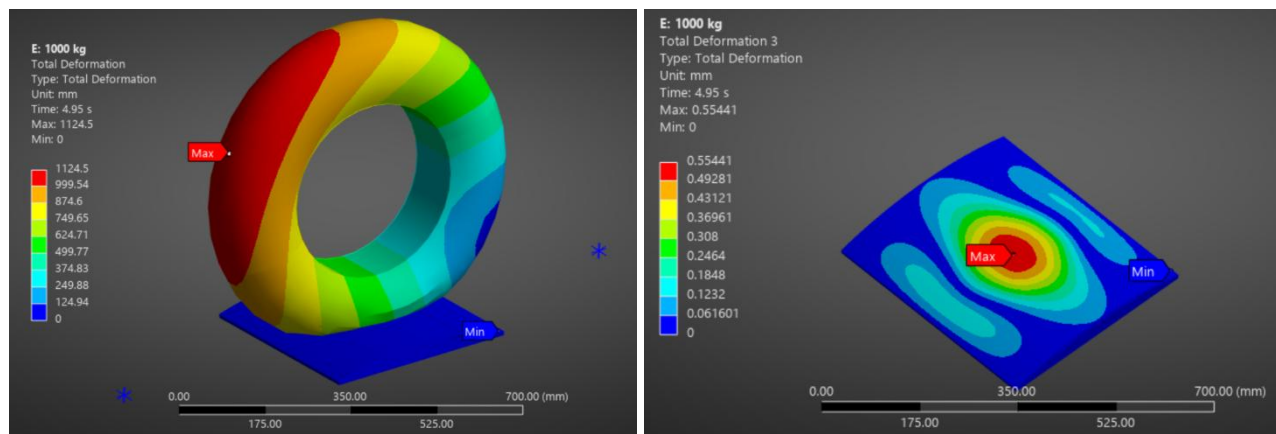


Fig. 7.6. Deplasări totale pe model global/senzor WIM – Scenariul III de încărcare

7.5.4 SCENARIUL IV: VITEZA DE 1,6 M/S

Scenariul IV corespunde aplicării unei încărcări a roții cu masa de 350 kg, la o viteză de 1,6 m/s. Sunt prezentate deformațiile totale ale ansamblului și ale senzorului, viteza rezultantă, distribuția tensiunilor echivalente von Mises, precum și comportamentul contactului dintre roată și senzor. Rezultatele permit evaluarea influenței creșterii vitezei asupra stării de solicitare a sistemului.

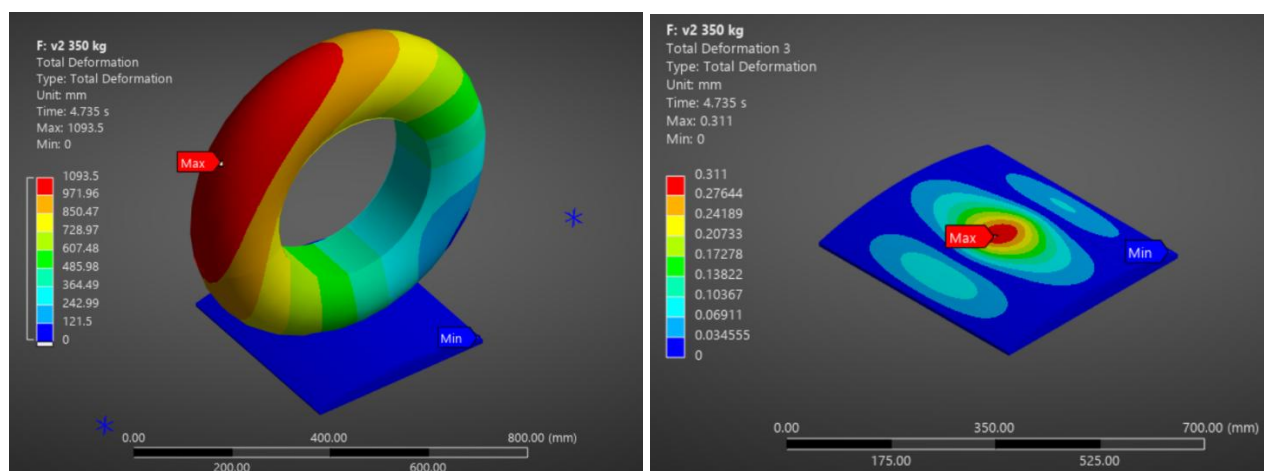


Fig. 7.7. Deplasări totale pe model global/senzor WIM – Scenariul IV de încărcare

7.5.5 SCENARIUL V: VITEZA DE 2 M/S

În Scenariul V sunt investigate efectele la încărcarea roții cu masa de 350 kg, la o viteză de 2 m/s. Se analizează deformațiile totale, viteza rezultantă, distribuția tensiunilor echivalente von Mises, statutul contactului și valorile presiunii de contact. Creșterea vitezei conduce la modificări semnificative ale stării de tensiune și deformație ale ansamblului.

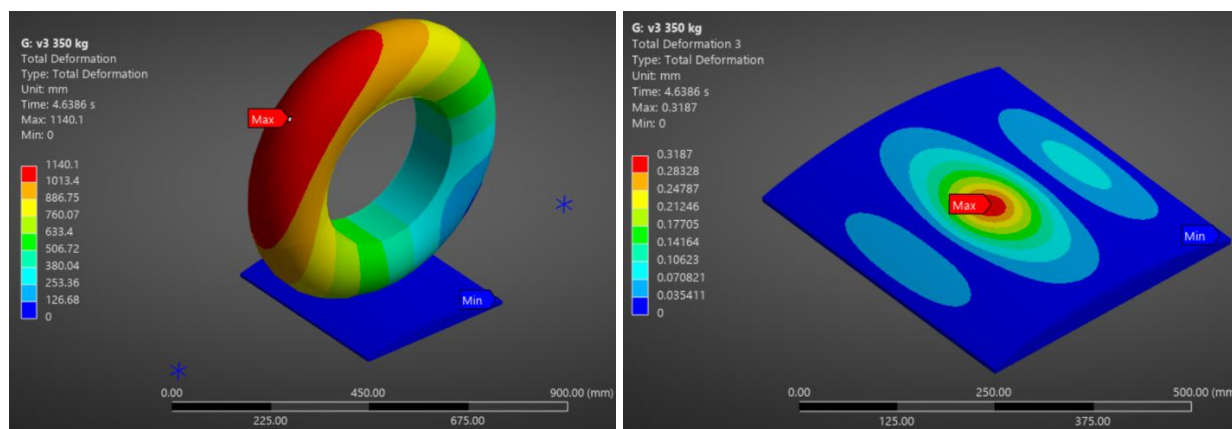


Fig. 7.8. Deplasări totale pe model global/senzor wim – Scenariul V de încărcare

7.5.6 SCENARIUL V: VITEZA DE 3 M/S

Scenariul VI se referă la comportamentul modelului la încărcarea roții cu masa de 350 kg și o viteză de 3 m/s. Sunt prezentate deformațiile totale ale ansamblului și ale senzorului, viteza de deplasare a modelului global, distribuția tensiunilor echivalente von Mises, precum și analiza presiunii și statutului contactului. Acest scenariu permite observarea efectelor maxime ale vitezei asupra integrității structurale a sistemului.

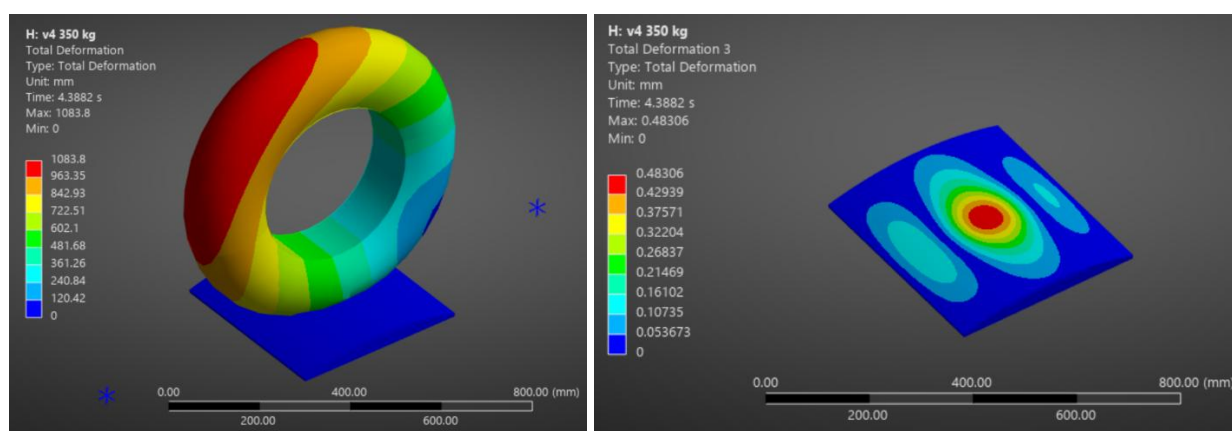


Fig. 7.9. Deplasări totale pe model global/senzor wim – Scenariul VI de încărcare

CAPITOLUL 8 : CALCUL TEHNICO-ECONOMIC PENTRU IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM DE CANTARIRE ÎN MIȘCARE A AUTOVEHICULELOR

În contextul modernizării infrastructurii rutiere și a necesității de a monitoriza și controla greutatea vehiculelor în trafic, implementarea unui sistem de cântărire în mișcare (Weigh-In-Motion - WIM) devine esențială. Aceste sisteme sunt utilizate pentru a măsura greutatea vehiculelor aflate în mișcare fără a perturba traficul, asigurând astfel o eficiență sporită în gestionarea traficului și a proiectării și întreținerii infrastructurii rutiere.

Senzorii pentru cântărirea în mișcare trebuie să fie extrem de precisi și rezistenți la diverse condiții de mediu. Specificațiile tehnice esențiale includ:

- Capacitate maximă de cântărire pe roată: (1000 kg);
- Precizie: $\pm 10\%$
- Viteză maximă a vehiculului: 25 km/h
- Interval de temperatură de operare: -40°C până la 70°C

Implementarea unui sistem WIM complet include mai multe componente, fiecare cu costurile sale specifice. Devizul de cheltuieli este structurat după cum urmează:

1. Senzori de cântărire;
2. Unitate de procesare și analiză;
3. Infrastructura de montare;
4. Alte echipamente și servicii.

Estimarea totală a costurilor pentru instalarea completă a un sistem WIM pe o stradă cu două benzi de circulație este prezentată în tabelul de mai jos. Se constata o scadere cheltuielilor de instalare la circa 500USD pentru o bandă de circulație, comparativ cu mii de USD pentru instalarea unui sistem WIM, dintre cele comercializate în prezent.

CONCLUZII GENERALE

După parcurgerea etapelor de cercetare, care au inclus studii teoretice, analiza documentară, concepție și simulări ale senzorilor de cântărire în mișcare a autovehiculelor, precum și analize bazate pe metoda elementelor finite, împreună cu cercetări experimentale realizate atât în laborator, cât și în condiții reale, s-au formulat următoarele concluzii generale:

1. Studiul documentar realizat în cadrul lucrării analizează critic stadiul actual al tehnologiei senzorilor WIM și al monitorizării traficului. În urma acestui studiu au fost trasate direcțiile de cercetare abordate în cadrul tezei. Au fost prezentate diverse tipuri de senzori WIM și s-au analizat avantajele și dezavantajele acestora.
2. A fost conceput, proiectat și realizat un senzor WIM modificat, cu sensibilitate mărită, destinat traficului urban;
3. A fost efectuată calibrarea statică în condiții de laborator a senzorului WIM modificat. Aceasta reprezintă prima etapă a calibrării, următoarea etapă fiind calibrarea dinamică a senzorului montat pe șosea..
4. Senzorii WIM au fost apoi calibrați dinamic, după ce au fost montați pe calea de rulare. Calibrarea dinamică a senzorilor constă în traversarea acestora cu vehicule cu configurații diferite, încărcături diferite și viteze diferite.
 - Doi senzori au fost montați astfel încât roțile vehiculului de pe fiecare punte să fie la același nivel în momentul traversării. Dintre cei doi senzori, doar unul a fost monitorizat cu ajutorul rozetelor tensometrice tip T, montate în semipunte;
 - Au fost efectuate mai multe serii de traversări cu un autovehicul Fiat Panda, un camion DAF LF și un SUV tip VW Touareg. Autovehiculele au fost cântărite pe fiecare punte înainte de traversare, cu un sistem de cântărire autorizat;
 - Toate canalele punții tensometrice Vishay P3 au fost echilibrate înainte de traversarea senzorilor. În timpul traversării senzorului, semnalele de ieșire de la rozetele tensometrice au fost înregistrate;
 - Rezultatele obținute prin AEF sunt în concordanță cu cele obținute prin calibrarea statică și dinamică (eroarile relative nu depășesc 6,48%).
5. Au fost efectuate analize cu elemente finite ale senzorului WIM realizat în cadrul tezei. Au fost studiate șase scenarii de traversare a senzorului WIM: roțile din față/spate ale autoturismului Fiat Panda trec prin zona centrală/laterală a senzorului; roțile din față/spate ale camionului DAF LF trec prin zona centrală a senzorului; roțile față/spate ale SUV-ului VW Touareg trec prin zona centrală a senzorului. Tensiunea maximă von-Mises a fost obținută în elementul elastic al senzorului, în valoare de 78,488 MPa pentru Fiat Panda, de 406,14 MPa pentru camionul DAF LF și de 130,48 MPa pentru Volkswagen Touareg. Valorile obținute prin analiza cu elemente finite au fost utilizate pentru a dimensiona elementul elastic, astfel încât tensiunile echivalente să nu depășească limita de curgere a materialului, iar sensibilitatea să fie suficient de ridicată. Distribuția presiunii la contactul dintre anvelopă și senzor a fost modelată pentru geometriile reale (dimensiunile și desenul anvelopelor și ale senzorului, anvelopele fiind considerate presurizate). Distribuția presiunii

la contact prezintă două benzi neîncărcate, generate de profilului anvelopelor. Se știe că suprafața de contact între anvelopă și drum este eliptică, cu un ax lung orientat în direcția de deplasare a vehiculului. Cu toate acestea, suprafețele de contact din Figurile 6 și 12 nu urmează această regulă, dar sunt realiste, deoarece contactul se realizează între anvelopă și suprafața cilindrică a părții superioare a senzorului, nu între anvelopă și o suprafața plană a căii de rulare. În cadrul analizei FEA, s-a simulat că anvelopele sunt umflate la presiunea nominală indicată de producător. S-a considerat că, fie și într-o analiză statică, suprafața de contact dintre anvelopă și senzor se schimbă treptat în funcție de încărcare și, prin urmare, coeficientul de frecare poate influența forma și dimensiunile acesteia. Coeficientul de frecare dintre anvelopă și senzor a fost luat în considerare. Rezultatele obținute prin analiza FEA au fost utilizate pentru proiectarea senzorului WIM și programarea experimentelor. În același timp, analiza FEA permite optimizări ale senzorului, prin modificarea datelor de intrare: dimensiuni geometrice, caracteristici mecanice și elastice ale materialelor; sarcina pe roată; modul de rulare etc. De exemplu, raza de curbura și grosimea elementului elastic ar putea fi optimizate în acest mod. Calculul a fost verificat conform criteriului de tip Eroare Structurală, care impune valori care să nu depășească 0,1-0,15 pe element, pentru elementele din zona de interes.

6. Cu ajutorul AEF s-a studiat interacțiunea mecanică dintre roțile vehiculelor și senzorii montați pe carosabil. Modul de rezemare și încărcare al modelului a fost configurat astfel încât să reproducă cât mai fidel condițiile reale de funcționare. sunt prezentate rezultatele obținute în urma modelărilor numerice efectuate pentru șase scenarii. Aceste scenarii au implicat combinarea a trei valori distincte ale sarcinii verticale aplicate (încărcarea roții cu masa de 350 kg, 700 kg și 1000 kg) și patru viteze de deplasare (1,1 m/s, 1,6 m/s, 2 m/s și 3 m/s). În aceste condiții, valorile maxime ale tensiunii von Mises obținute prin AEF au fost sub limita de curgere a oțelului structural utilizat pentru conexiunea senzorului;

7. Din AEF a rezulat că senzorul realizat în cadrul tezei ar rezista la 338.535 de traversări cu autovehicule grele, până când începe cedarea prin oboseală. Din datele extrase din recensamentele de trafic făcute în cadrul tezei pentru municipiul Piatra Neamț, rezultă că senzorul WIM instalat în acest trafic ar rezista pe cea mai aglomerată arteră timp de 10,54 ani;

8. Calculul tehnico-economic a demonstrat o scădere cheltuielilor de confecționare și instalare a senzorului WIM dezvoltat în cadrul tezei sub 1000 USD pentru o bandă de circulație, comparativ cu zeci de mii de USD pentru sistemele WIM comercializate în prezent.

CONTRIBUȚII PROPII

Teza de doctorat explorează o mare varietate de aspecte teoretice și probleme referitoare la senzorii WIM, fiind însoțită de simulări numerice și cercetări experimentale, multe dintre acestea fiind caracterizate prin elemente de originalitate. În acest context, eforturile depuse pentru dezvoltarea lucrării și atingerea obiectivelor propuse sunt susținute de o serie de contribuții personale. Astfel, teza a adus un aport original semnificativ în mai multe direcții, iar contribuțiile semnificative sunt următoarele:

1. Realizarea unei analize documentare extinse și critice:
 - Prezentarea și evaluarea senzorilor WIM cunoscuți, cu focalizare pe senzorii comercializați în prezent. Analiza modului de funcționare a acestora, a avantajelor și dezavantajelor aferente.
 - Compararea senzorilor comerciali pe baza preciziei, a costurilor de achiziționare, instalare și întreținere, a duratei de viață etc.;
 - Identificarea criteriilor esențiale pe care trebuie să le îndeplinească senzorul WIM;
 - Fixarea direcțiilor de cercetare care vor fi abordate în cadrul tezei.
2. Dezvoltarea unui nou senzor WIM suprateran, destinat traficului urban:
 - Conceperea, proiectarea și realizarea unui senzor WIM suprateran modificat, pentru care s-a depus cererea de brevet RO 137668 A2/2022, Mihăila Marius, Blănari Igor, Morăraș Ciprian-Ionuț, Bârsănescu Paul-Doru, „Senzor cu sensibilitate ridicată, pentru cântărirea autovehiculelor în mișcare”. Principalele modificări, fata de stadiul existent, constau în introducerea unor fante între elementul elastic și capacele laterale și utilizarea unor rozete tensometrice tip T în locul marciilor tensometrice uzuale;
 - Cu ajutorul AEF s-a dimensionat elementul elastic al senzorului și s-a putut realiza combinație optimă între precizie, durabilitate și costuri reduse;
 - S-a demonstrat, prin AEF și experimental, ca noul senzor prezintă avantajul unei sensibilități, precizii și duranțe sporite. În consecință, obiectivele fixate inițial au fost realizate.
3. Realizarea unei AEF extinse și realiste pentru modelarea comportamentului senzorului WIM studiat:
 - Simularea, cu ajutorul AEF, a comportamentului senzorului, atât pentru calibrarea în laborator, cât și pentru traversarea acestuia cu diferite categorii de autovehicule;
 - Estimarea, cu ajutorul AEF, a duranței și a duratei de viață a senzorului WIM;
 - Simularea cu AEF a contactului dintre anvelopele autovehiculelor utilizate în experiment (considerate umflate la presiunea indicată de producător) și senzor, determinarea petei de contact și a presiunilor de contact, lăunând în considerare coeficientul de frecare dintre anvelopă și senzor;
 - Compararea, cu ajutorul AEF, a principalelor criterii de performanță ale senzorului propus în cadrul tezei și respectiv a senzorului suprateran existent;
 - Determinarea erorilor relative dintre AEF și rezultatele experimentale. și formularea de concluzii.

4. Determinări experimentale:
 - Calibrarea statică a senzorului WIM pe pulsatorul Instron 8801;
 - Calibrarea dinamică a senzorului, prin traversarea lui cu diverse categorii de autovehicule (autoturism, SUV și camion). Datorită dificultăților de obținere a autorizațiilor pentru montarea senzorului pe sosea, acesta a fost testat într-o incintă închisă, la viteze de numai 5 km/h, în loc viteze de până la 20km/h.
5. Analiza performanțelor senzorului, inclusiv a costurilor și compararea acestor performanțe cu cele ale unor senzori WIM comercializați în prezent;
6. Determinarea volumului și structurii traficului pe unele drumuri din municipiul Piatra Neamț, în vederea estimării anduranței senzorului WIM în condiții reale de trafic;
7. Analiza, prelucrarea și interpretarea rezultatelor experimentale;
8. Determinarea erorilor relative dintre rezultatele obținute prin AEF și experimental. Valorile acceptabile ale acestor erori validează precizia celor două metode utilizate;
9. Formularea de concluzii și propunerea unor direcții viitoare de cercetare.

DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Se prevede continuarea cercetarilor în următoarele direcții de cercetare, care ar putea conduce la contribuții semnificative în domeniul dezvoltării senzorilor de cântărire în mișcare a autovehiculelor:

- Dezvoltarea și optimizarea senzorilor existenți, care ar explora opțiunile pentru în direcția creșterii preciziei și a eficienței sporite în ceea ce privește cântărirea în mișcare a autovehiculelor. Aceasta ar putea implica îmbunătățirea tehnologiilor curente sau dezvoltarea unor inovații tehnologice menite să furnizeze măsurări mai precise și mai stabile;
- Analiza datelor și implementarea algoritmilor avansați, cu care s-ar putea investiga tehnici avansate de analiză a datelor și elaborarea de algoritmi pentru interpretarea și procesarea datelor furnizate de senzori. Algoritmii pot fi ajustați pentru a gestiona o varietate de condiții de mediu și pentru a furniza rezultate precise în timp real;
- Integrarea cu tehnologii emergente: care ar investiga modalitățile prin care sistemul de cântărire în mișcare poate fi integrat cu tehnologii emergente, precum vehiculele autonome sau rețelele Internet of Things (IoT). Această convergență ar putea aduce avantaje semnificative în ceea ce privește monitorizarea și gestionarea eficientă a parcului auto;
- Aspecte legale și reglementări: care ar aborda aspectele legale și reglementările referitoare la utilizarea sistemelor de cântărire în mișcare. Investighează modalități de conformare cu standardele existente și propune soluții pentru a face față potențialelor provocări juridice sau reglementari;
- Având în vedere concluziile obținute din studiul efectuat, care indică că poziția forței aplicate asupra plăcii superioare a dispozitivului influențează semnificativ mărimea semnalului de ieșire al mărcilor tensometrice și, implicit, procesul de măsurare, se propune implementarea unui algoritm specific procesului de măsurare. Acest algoritm ar urma să abordeze această influență, având ca scop îmbunătățirea preciziei dispozitivului dezvoltat;
- Eficiență energetică: căutarea de soluții pentru optimizarea consumului de energie al sistemului, având în vedere o implementare sustenabilă pe termen lung;
- Pentru validarea senzorilor WIM se vor extinde studiile pentru a determina eficacitatea senzorilor WIM în condiții diverse de operare și în diverse medii geografice și climatice;
- Extinderea capacităților dispozitivului prin implementarea unui sistem de măsurare și software corespunzător, care să permită simultan monitorizarea traficului pe traseul urban desemnat.
- Integrarea senzorilor WIM în sistemele inteligente de gestionare a traficului urban.

BIBLIOGRAFIE

Agape, I., Donțu, A. I., Maftai, A., Gaiginschi, L., & Bârsănescu, P. D. (2019). Actual types of sensors used for weighing in motion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 572, 012102. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/572/1/012102>

Albayati, A. H. (2023). A review of rutting in asphalt concrete pavement. *Open Engineering*, 13(1), 20220463. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0463>

ASTM International. (2017). *ASTM E1318-09(2017): Standard specification for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test methods*.

Bârsănescu, P., Cârlescu, P., & Stoian, A. (2009). *Senzori pentru cântărirea autovehiculelor în mișcare*. Iași: Editura Tehnopress.

Comisia Economică pentru Europa a Națiunilor Unite. (2024). *Statistics of road traffic accidents in Europe and North America* (Vol. LVII). Geneva: Divizia pentru Transporturi Durabile, UNECE. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la <https://unece.org/transport/publications/2023-statistics-road-traffic-accidents>

Compania Națională de Administrare a Infrastructurii Rutiere S.A. (2022). *Raportul administratorilor pentru anul 2022*. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la <https://www.cnadnr.ro/sites/default/files/pagini-statice/Raportul%20Administratorilor%202022.pdf>

Dini Argeo. (2025). *AF08: Software pentru indicatori 3590E pentru sisteme de cântărire a roților cu mai multe platforme*. Recuperat la 3 februarie 2025, de la <https://www.diniargeo.it/prd/bilance/indicatori-di-peso/software-di-pesatura-per-3590e-cpwe/pesa-ruote-varie-piattaforme.aspx>

Donțu, A.-I. (2021). *Contribuții teoretice și experimentale privind dezvoltarea unor senzori de monitorizare a masei autovehiculelor în mișcare* (Teză de doctorat, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași).

Dumbravă, T.-I. (2018). *Implicarea performanțelor autovehiculelor în generarea zonelor negre care reduc nivelul siguranței traficului rutier* [Rezumat teză de doctorat, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași].

Hagenzieker, M. P. (2010). Editorial: Safety science special issue on road safety management. *Safety Science*, 48(9), 1081–1084. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.07.004>

IIT Bombay. (2025). Non-Intrusive Technologies. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/nptel/526_AutoVideo/web/web.html

Inspectoratul General al Poliției Române. (2012). *Buletinul siguranței rutiere. Raport anual 2011*. Recuperat la 21 aprilie 2025, de la [https://politiaromana.ro/files/pages_files/Buletinul_sigurantei_rutiere - Raport anul 2011.pdf](https://politiaromana.ro/files/pages_files/Buletinul_sigurantei_rutiere_-_Raport_anul_2011.pdf)

International Organization for Standardization. (1995). *ISO 4950-2:1995 – High yield strength flat steel products – Part 2: Products supplied in the normalized or controlled rolled condition*. Geneva: ISO. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la <https://www.iso.org/standard/10969.html>

Jihanny, J., Subagio, B. S., & Hariyadi, E. S. (2018). The analysis of overloaded trucks in Indonesia based on weigh-in-motion data (East of Sumatera National Road case study). *MATEC Web of Conferences*, 147, 02006. https://doi.org/10.1051/mateconf/201814702006Matec_Conferences+3

Kistler. (2024). *Commercial vehicle enforcement with weigh in motion by Kistler*. Recuperat la 23 aprilie 2025, de la <https://www.kistler.com/US/en/commercial-vehicle-enforcement-with-weigh-in-motion-by-kistler-proves-itself-in-luxembourg/C00000671>

Kochevar, D., & Saito, M. (2003). *Detector technology evaluation: Final report* (MPC Report No. 03-154). Mountain-Plains Consortium, North Dakota State University. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la <https://www.ugpti.org/resources/reports/downloads/mpc03-154.pdf>

Lam, P. T., Lee, J., Lee, Y., Nguyen, X. T., Vy, V., Han, K., & Yoon, H. (2025). A vision-based weigh-in-motion approach for vehicle load tracking and identification. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 40, 1466–1489. <https://doi.org/10.1111/mice.13461>

Lawn, J., Pearson, D. J., McKinley, D., & Fryburger, B. E. (2017). Slow speed weigh-in-motion system with flexure (US2017030764A1). United States Patent and Trademark Office.

Lees, A. (2024). *What is an ESAL? Guide to equivalent single axle loads*. Tensar International. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la <https://www.tensarinternational.com/resources/articles/what-is-an-esal-guide-to-equivalent-single-axle-load>

Linkov, V. N., Kajdanov, D. I., & Chernousova, S. V. (1989). *Sistem de cântărire a vehiculelor în mișcare* (Brevet nr. SU1465713 A1). Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci, URSS.

Mardare, I. (2012). *Contribuții teoretice și experimentale privind utilizarea transducerii undelor de forță și putere prin lichide, cu aplicații la traductoare* (Teză de doctorat, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași).

Mihăilă, M., Blanari, I., Morăraș, C.-I., & Bârsănescu, P.-D., *Cerere brevet de invenție* RO 137668 A2/2022, *Senzor cu sensibilitate ridicată, pentru cântărirea autovehiculelor în mișcare*. Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci (OSIM).

Oak Ridge National Laboratory. (2003). *DP 121 Weigh-in-Motion Technology – Bending Plate*. U.S. Department of Energy.

On board weighing systems. (2021). Recuperat de la <http://www.is-wim.org/index.php?nm=2&nsm=7&lg=en>

Organizația Mondială a Sănătății. (2012). *Distribution of road traffic deaths by type of road user (%)*. Recuperat la 9 aprilie 2025, de la [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/distribution-of-road-traffic-deaths-by-type-of-road-user-\(percent\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/distribution-of-road-traffic-deaths-by-type-of-road-user-(percent))

Productivity Commission. (2006). *Weigh-in-Motion Technology*. Retrieved from https://www.pc.gov.au/inquiries/completed/road-rail-freight/submissions/transport_certification_australia/sub024attachment2.pdf