

STUDIUL STRUCTURILOR RUTIERE CU STRAT DE UZURĂ REALIZAT DIN MIXTURI ASFALTICE CU ADAOS DE POLIMER

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie civilă și instalații

autor ing. Adelin Emanuel ȘTIRB

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Adrian-Liviu CIUTINA

luna Aprilie anul 2025

Teza de doctorat „Studiul structurilor rutiere cu strat de uzură realizat din mixturi asfaltice cu adaos de polimer” a fost elaborată pe baza studiilor și cercetărilor efectuate în cadrul Laboratorului de geotehnică și căi de comunicație terestre al Facultății de Construcții – Departamentul de Căi de Comunicație Terestre, Fundații și Cadastru.

Obiectivul principal al tezei de doctorat constă în efectuarea unor comparații detaliate între caracteristicile mixturilor asfaltice clasice utilizate în stratul de uzură al drumurilor de clasă tehnică IV-V (preparate la temperaturi de aproximativ 145°C) și cele cu polimeri pe bază de plastic reciclat (produse la temperaturi de 180°C), cu scopul de a evalua viabilitatea utilizării mixturilor asfaltice cu polimeri pe bază de plastic reciclat în condițiile de trafic și climatice din România.

Studiul include analiza dimensionării și modelării unor structuri rutiere suple frecvent utilizate pe drumurile de clasă tehnică IV-V din România, utilizând ca strat de uzură mixturile asfaltice ale căror caracteristici de deformabilitate (modulul de elasticitate dinamic) au fost determinate în cadrul studiului. Această abordare este esențială pentru a înțelege comportamentul mixturilor pe termen lung și pentru a optimiza proiectarea structurilor rutiere care integrează aceste materiale inovative.

De asemenea, studiul analizează impactul ecologic al soluțiilor tehnice utilizate pentru integrarea plasticului reciclat, comparativ cu tehnologia tradițională.

Mixturile asfaltice cu polimeri pe bază de plastic reciclat, deși produse la temperaturi mai mari, oferă un avantaj semnificativ în ceea ce privește rezistența la deformații permanente, comparativ cu mixturile asfaltice clasice.

Primul capitol prezintă o sinteză a studiilor bibliografice efectuate cu privire la stadiul cunoașterii la nivel internațional în ceea ce privește producerea mixturilor asfaltice cu adaos de polimeri plastomeri și la stabilirea necesității implementării unor astfel de tehnologii pornind de la conceptul general al dezvoltării durabile.

Transportul de mărfuri și pasageri este în creștere la nivel mondial, o mare parte fiind atribuită vehiculelor cu motor care au adesea un impact grav asupra sănătății umane, a calității mediului. Traficul susținut modifică modelele de dezvoltare urbană, starea drumurilor și normele de siguranță rutieră. Din ce în ce mai mult, țările dezvoltate și în curs de dezvoltare caută strategii pentru a garanta mobilitatea individuală și, în același timp, încearcă să îmbunătățească condițiile ecologice și sociale. Dezvoltarea durabilă este din ce în ce mai mult adoptată ca un cadru pentru proiectarea și punerea în aplicare a unor astfel de strategii iar aspectele legate de transportul rutier

sunt în acest context de o importanță deosebită [1].

Termenul de „dezvoltare durabilă” este din ce în ce mai des utilizat inclusiv în domeniul industriei rutiere. În ultimul deceniu, în întreaga lume au fost elaborate numeroase politici și strategii privind sustenabilitatea transportului rutier, pentru a satisface nevoile generațiilor actuale fără a compromite capacitatea generațiilor viitoare de a-și satisface propriile nevoi (conform celei mai acceptate definiții a dezvoltării durabile) [2].

În ultimii ani, dezvoltarea durabilă din industria drumurilor a urmat direcții de acțiune care consideră reciclarea mixturilor asfaltice existente și reciclarea / reutilizarea / reintegrarea unor materiale reziduale (cauciuc, plastic, sticlă etc.) ca înlocuitori pentru materialele constitutive ale mixturilor asfaltice. Utilizarea produselor reziduale în producția mixturilor asfaltice a devenit tot mai răspândită datorită avantajelor economice și de mediu. În special, întrebuintarea deșeurilor din plastic reciclat în lianți și în mixturi asfaltice devine din ce în ce mai investigată, datorită cantităților impresionante de deșeuri existente [3].

Potrivit unui studiu din anul 2018 (Figura 1) prezentat de către Parlamentul European [4], doar 32,5% din totalul de deșeuri din plastic colectate la nivelul statelor Uniunii Europene, a fost reciclat. Restul de 42,6% au fost utilizate în producerea de energie sau căldură, respectiv 24,9% din totalul de deșeuri plastice au fost depozitate în deponeuri.

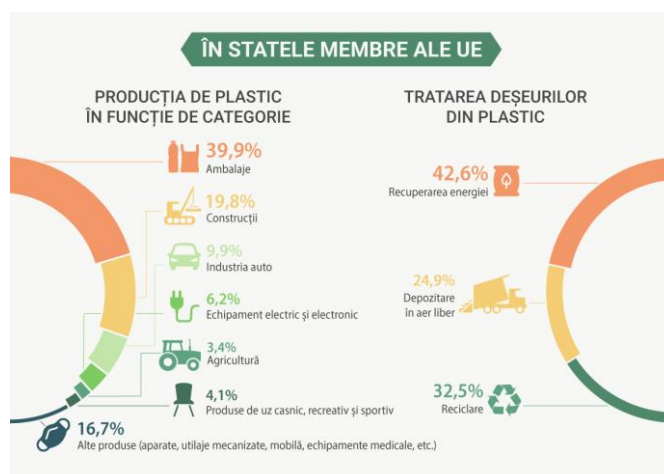


Figura 1. Producția și tratarea deșeurilor din plastic în statele membre ale Uniunii Europene [4]

Prima utilizare a deșeurilor plastice în mixturile asfaltice datează din anii 1990, când au fost utilizate materialele plastice sub formă de fibre [5]. De atunci, includerea anumitor tipurilor de materiale plastice (deșeuri și polimeri) a fost investigată de către diverși cercetători [6]. Cele mai utilizate forme de deșeuri din plastic sunt polietilena de înaltă densitate (HDPE), polietilena de joasă densitate (LDPE), polipropilena (PP), polietilen tereftalat (PET), etilen-vinil acetat (EVA), clorura de polivinil (PVC) [7], polietilena (PE) [8] și polietilen tereftalat (PTP) [9]. Investigațiile au arătat că parametrii de performanță ai mixturilor asfaltice, cum ar fi rezistența la orniere [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], rezistența la oboseală [17], [11], [14], [18], [19], și modulul de rigiditate [20], [21] pot fi îmbunătățite atunci când se adaugă deșeuri de plastic și polimeri din plastic în masa mixturilor asfaltice. Cu toate acestea, diferite rezultate au fost prezentate în literatura de specialitate în funcție de parametri urmăriți. De exemplu, experimentele privind efectele HDPE și PP asupra rezistenței la orniere nu conduc la rezultate concludente [22]. Există o varietate de motive pentru neconcordanțele înregistrate, inclusiv variabilități ale caracteristicilor probelor, condiții de amestecare necorespunzătoare, lipsa controlului temperaturii

și erori experimentale. De asemenea, este foarte important să se înțeleagă modul în care deșeurile din plastic sunt introduse în amestec. Diferitele metode de amestecare au efecte diferite asupra performanței mixturii rezultate.

Capitolul al doilea prezintă încercările de laborator efectuate asupra agregatele naturale și asupra bitumului utilizat în producerea mixturilor asfaltice analizate în prezentul studiu. Mixturile asfaltice trebuie să îndeplinească anumite condiții calitative și tehnice în funcție de stratul în care sunt utilizate. Materialele componente ale mixturilor asfaltice trebuie să respecte la rândul lor anumite condiții de calitate bine stabilite prin normativul AND 605 [23]. În conformitate cu normele tehnice în vigoare, calitatea materialelor componente respectiv a mixturilor asfaltice este evaluată în mai multe etape, inclusiv la sursă, la aprovizionare, la faza de punere în operă, la recepția de terminare a lucrărilor etc.

Referitor la agregatele analizate și la filer, toate caracteristicile determinate se regăsesc în limitele impuse de către normativele specifice în vigoare. Agregatele considerate - criblura sort 8-16 și criblura sort 4-8 - au prezentat rezistențe bune la uzură, cu coeficienți M_{DE} ai căror valori se regăsesc cu mult sub valorile maxime impuse de normativul AND 605 [23]. Atât agregatele naturale cât și filerul au prezentat o granulozitate continuă, în urma cernerii, cu trecerile prin site în intervalele de valori specificate de către normele românești în vigoare. În ceea ce privește forma agregatelor, procentul cel mai ridicat de agregate se încadrează în categoria agregatelor poliedrice, cu o formă corespunzătoare, ce ajută la asigurarea compactării viitoarelor mixturi asfaltice, dar și la rezistențe mecanice sporite.

Teste convenționale: penetrația la 25°C, indicele de penetrație, punctul de înmuiere inel și bilă, ductilitatea, revenirea elastică și adezivitatea au fost efectuate pe bitumul pur și pe amestecuri de bitum și polimer în procente menționate. În total au fost analizate bitumul pur și 5 amestecuri de bitum cu polimer. Toți parametrii menționați mai sus au fost analizați în vederea evidențierii influenței pe care o are polimerul asupra bitumului pur.

Analizele de laborator au demonstrat că bitumul analizat este de tip bitum rutier 50/70, ale cărui caracteristici analizate se regăsesc în valorile impuse pentru acest tip de liant bituminos. De asemenea, rezultatele testelor de adezivitate efectuate asupra agregatelor peliculizate cu acest liant sunt favorabile, liantul având o aderență foarte bună, realizând o bună anrobare a acestora. Încercarea de revenire elastică, în prima etapă s-a efectuat și asupra bitumului pur, valoarea rezultată fiind scăzută, având în vedere faptul că testele nu se efectuează decât pe bitumurile modificate. În acest caz, R_{EL} a fost determinată și pentru bitumul pur pentru a avea o valoare de comparație cu valorile obținute în cazul amestecurilor de bitum pur 50/70 și polimer în diverse procente de 2%, 4%, 8% respectiv 10%.

Rezultatele testelor de laborator prezintă o scădere continuă a valorii penetrației (Figura 2), odată cu creșterea procentului de polimer. Pentru niciun caz analizat de bitum cu polimer, valoarea penetrației nu se încadrează în valorile limită ale bitumului pur 50/70. Practic polimerul modifică consistența bitumului, conducând la durificarea acestuia.

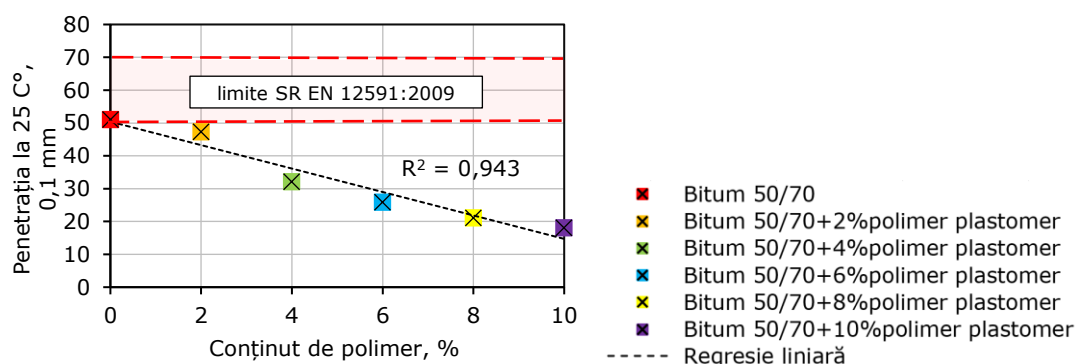


Figura 2. Rezultate determinare penetrației la 25°C în funcție de conținutul de polimer

Valorile calculate pentru I_P prezintă creșterea susceptibilității bitumului la temperatură, mai ales în cazul amestecului cu 10% polimer. Amestecurile cu 2% și 4% polimer, păstrează liantul în valorile limită ale unui bitum 50/70. În vederea obținerii unor concluzii mai clare cu privire la comportarea bitumului și a amestecurilor analizate la temperaturi mai joase sau mai ridicate, încercări suplimentare BBR respectiv DSR ar fi imperios necesare suplimentar testelor efectuate.

O durificare accentuată a bitumului poate fi observată și în urma analizei rezultatelor de ductilitate (Figura 3). Dacă în cazul bitumului pur, ductilitatea a atins valoarea maximă a ductilometrului de 1500 mm, pentru amestecurile analizate valoarea ductilității scade gradual, cu până la 90% față de valoarea ductilității bitumului pur în cazul procentului de 10% polimer.

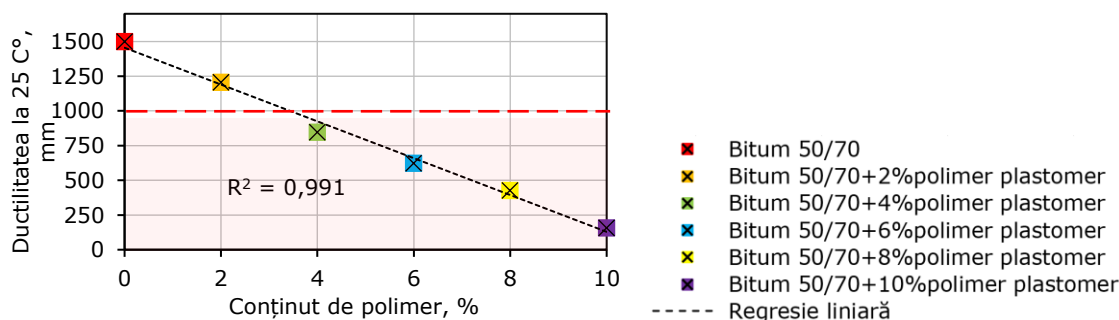


Figura 3. Rezultatele testelor de determinare a ductilității funcție de conținutul de polimer

Cu toate că polimerul conduce la durificarea bitumului și la creșterea consistenței, valorile adezivității sunt corespunzătoare, excepție făcând amestecul cu 10% polimer pentru care valoarea adezivității a fost mai mică cu 3% față de valoarea minimă impusă de normativ AND 605 [23]. Cea mai mare valoare a adezivității îi corespunde amestecului cu 6% polimer, pentru care valoarea obținută a depășit cu cca 13% valoarea minimă impusă de 80%.

În concluzie, polimerul are un impact important asupra caracteristicilor finale ale bitumului: amestecurile compuse cu diferite procente de polimer și bitum se îndepărtează de categoria bitumului cu clasa de penetrație 50/70. Astfel, bitumurile noi rezultate sunt bitumuri mai dure, cu un punct de înmuiere mai ridicat față de cel inițial, ductilități mai reduse, însă, pentru unele procente mai scăzute de polimer, valoarea REL este mai ridicată, dar sunt în limitele bitumurilor modificate, utilizate în tehnica rutieră din România.

Totuși, scopul final al analizei pe bitumuri cu conținut de polimer în diferite procente nu a fost modificarea și obținerea unor caracteristici corespunzătoare unui bitum modificat, ci evaluarea influenței asupra caracteristicilor inițiale ale bitumului pur. Pe baza unor studii similare [24], [25],

[26], [27], [28], este de așteptat totuși ca bitumurile modificate să sporească rezistența la deformații permanente ale mixturilor asfaltice.

Capitolul al treilea investighează influența pe care o are polimerul plastomer utilizat în amestec cu bitumul pur – pe baza rezultatelor prezentate în Capitolul 2 - asupra caracteristicilor fizico-mecanice ale mixturilor asfaltice produse cu procente diferite de polimer. O mixtură asfaltică de referință tip BA 16, preparată convențională la cald - beton asfaltic cu dimensiunea maximă a granulei de agregat de 16 mm - a fost considerată ca fiind mixtura asfaltică de referință. Pornind de la caracteristicile mixturii asfaltice de referință, au fost preparate cinci mixturi asfaltice cu adaos de polimer plastomer de 2%, 4%, 6%, 8% și 10%.

În prima parte a capitolului se prezintă în detaliu modul de realizare a testelor de laborator efectuate pe mixturile asfaltice. A doua parte a capitolului prezintă rezultatele pentru mixtura asfaltică de referință iar în partea a 3-a a capitolului sunt prezentate rezultatele de laborator efectuate pe mixturile asfaltice cu adaos de polimer plastomer.

Planul experimental realizat pe mixturi a fost împărțit în două etape, în vederea analizării mixturilor asfaltice. În prima etapă au fost preparate și analizate 12 mixturi asfaltice, pornind de la trei curbe de granulozitate diferite și patru procente de liant pentru fiecare dozaj în parte. Cercetarea din prima etapă a condus la stabilirea unui dozaj de liant optim cu 4,7% bitum și a unei curbe de granulozitate corespunzătoare pentru mixtura asfaltică de referință.

În etapa a doua, cinci mixturi asfaltice preparate cu procente diferite de polimer plastomer (2%, 4%, 6%, 8% și 10%) au fost supuse unor încercări de laborator în vederea studierii influenței pe care îl are polimerul asupra caracteristicilor fizico-mecanice, a rezistențelor la deformații permanente și asupra proprietăților termomecanice ale mixturilor asfaltice analizate. A fost considerată mixtura asfaltică din prima etapă cu procentul de 4,7% bitum și curba de granulozitate numărul 2 ca mixtură asfaltică de referință.

Caracteristicile Marshall au demonstrat că sporirea procentului de polimer conduce la apariția unui caracter mai rigid al mixturilor asfaltice analizate cu o creștere a stabilității Marshall peste limita impusă de către normativul românesc actual. În cazul indicelui de curgere, tendința este de scădere, însă și în această situație, valorile se încadrează în limitele minime și maxime impuse de către AND 605 [23], cu o valoare R^2 de 0,792.

Testele de determinare a modulului de rigiditate au fost realizate prin încercarea de întindere indirectă la temperatura de 20°C, iar rezultatele experimentale (Figura 4) obținute au fost analizate pentru a evidenția influența polimerului plastomer. Concluzia încercărilor de laborator indică faptul că sporirea procentului de polimer are un efect creștere a valorilor rigidității cu o valoare $R^2=0,847$.

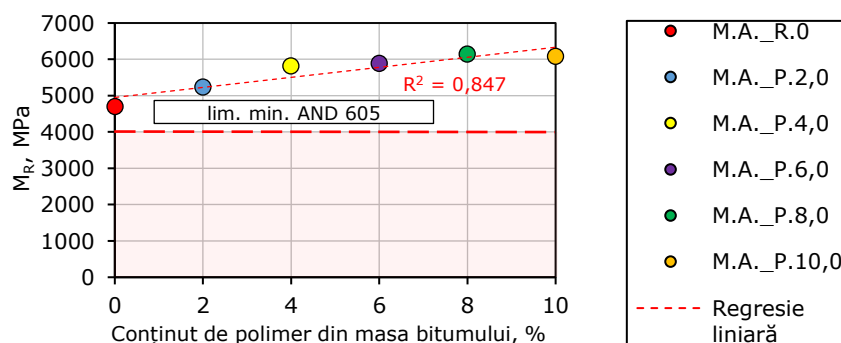


Figura 4. Modulul de rigiditate la 20°C - valori experimentale vs. limitele impuse de către AND

605, pentru mixturile asfaltice din etapa a doua

Referitor la testele de determinare a rezistenței la deformații permanente (fluajul dinamic), pornind de la valorile obținute în cazul modulului de rigiditate, valorile deformației nu prezintă o tendință clară odată cu creșterea procentului de polimer, tendințele neurmărind o variație logică. Totuși, comportarea cea mai bună a fost observată în cazul mixturii asfaltice cu 6% polimer, comparația realizându-se cu celelalte mixturi cu adaos de polimer. În schimb, viteza de deformație (Figura 5) prezintă o creștere liniară cu o valoare $R^2=0,936$. Probabil temperatura de 50°C în cazul acestei determinări conduce la scăderea rigidității mixturilor asfaltice, de aici rezultând valori care prezintă o creștere în termeni de deformație.

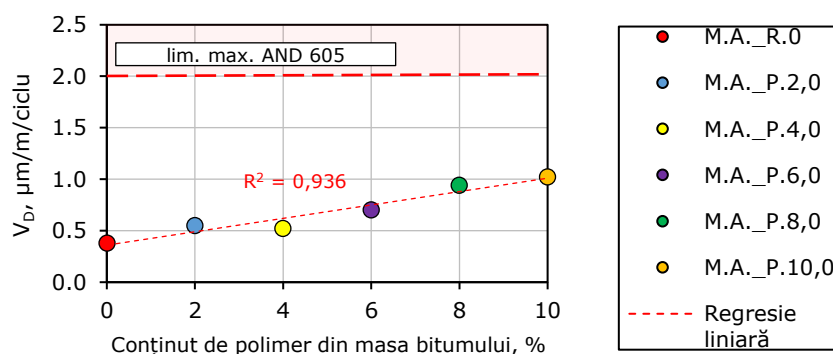


Figura 5. Viteza de deformație – valori experimentale vs. limitele impuse de către AND 605, pentru mixturile asfaltice din etapa a doua

Efectul defavorabil al influenței procentului de polimer asupra comportamentului mixturilor asfaltice analizate în mediu umed poate fi observat începând cu procentul de 6%, pentru care valorile sensibilității la apă încep să scadă, inclusiv sub valoarea minimă impusă de normativul AND 605 pentru procente de 8% respectiv 10% polimer. Tendința de scădere a valorilor sensibilității la apă este similară celei rezultatelor încercărilor de determinare a adhezivității dintre bitumul amestecat cu polimer și agregatele naturale utilizate, valorile R^2 obținute fiind apropiate.

Concluzia principală a capitolului demonstrează că utilizarea polimerului plastomer în diferite procente conduce la sporirea caracteristicilor fizico-mecanice, a rezistențelor la deformații permanente și asupra proprietăților termomecanice ale mixturilor asfaltice analizate. Creșterea procentului de utilizare al polimerului nu a avut întotdeauna un efect pozitiv. Pentru unele caracteristici, cum ar fi sensibilitatea la apă, indicele de scurgere, volumul de goluri și absorbția de apă, influența polimerului a fost una negativă, conducând la scăderea anumitor valori de răspuns sau conferirea unor caracteristici necorespunzătoare mixturilor. În urma analizei detaliate, atât din punctul de vedere al valorilor obținute cât și din punctul de vedere al omogenității și lucrabilității mixturii asfaltice, mixtura cu procentul de 6% polimer (M.A._P.6,0) prezintă caracteristicile unei mixturi asfaltice ce ar putea fi aplicată la condițiile din România.

Capitolul al patrulea este axat pe dimensionarea și modelarea numerică a trei structuri rutiere suple având stratul de uzură alcătuit din mixturi asfaltice tip BA16 beton asfaltic având dimensiunea maximă a granulei de agregat de 16 mm. Au fost considerate în total trei structuri rutiere (S.R._M.A._S; S.R._M.A._R; S.R._M.A._P.6,0) având straturi de legătură similare și stratul de uzură realizat din mixturi asfaltice diferite, două dintre mixturi fiind analizate în capitolul 3 (M.A._R.0 și M.A._P.6,0).

Dimensionarea structurilor rutiere joacă un rol major în dezvoltarea unor drumuri cu durată de exploatare ridicată. Selectarea corectă a materialelor componente, alegerea grosimii corespunzătoare fiecărui strat în funcție de traficul estimat și de condițiile climaterice împreună cu estimarea comportamentului viitoare structurii, sunt esențiale în vederea asigurării unor performanțe ridicate ale structurii și reducerea nu doar a costurilor de întreținere și reabilitare, cât și a costurilor de exploatare a vehiculelor [29]. Pentru dimensionarea structurilor rutiere din România suple, mixte și rigide se țin cont de normativele și prevederile în vigoare. Utilizarea „metodei analitice” de dimensionare a structurilor rutiere suple și mixte se încadrează în logica uniformizării metodologiei de dimensionare a structurilor rutiere din țările europene.

Dimensionarea structurilor rutiere considerând straturile perfect legate între ele ca un sistem multistrat facilitează modelarea structurii și procesul de calcul. Metoda franceză de dimensionare a structurilor rutiere suple și mixte (semirigide), pe care se bazează pe modelul elastic utilizat de programul de calcul Alizè, permite o legătură perfectă între straturile rutiere, le consideră nelegate sau cu o legare 50% legate. Modelul de calcul folosit prin programul Alizè este una dintre cele mai populare metode de dimensionare la nivel mondial. În acest sens, studiile efectuate pe structuri rutiere specifice au arătat că durată de viață a unei structurii rutiere variază foarte mult în funcție de modul în care straturile rutiere lucrează împreună [29].

Pe lângă programele „tradiționale” de dimensionare a structurilor rutiere, programe generale de calcul cu element finit (FEM), precum Abaqus, pot fi utilizate la analiza structurilor rutiere. Programele FEM oferă modele de legături dintre materiale oferite de program și posibilitatea de a include modele de materiale constitutive complexe de legare prin modificarea opțiunilor existente sau prin crearea de noi opțiuni. Toate acestea deschid posibilitatea efectuării unor analize pentru probleme mai specifice, în care sunt necesare modele speciale de material, condiții de margine și de geometrie. Sensibilitatea rezultatelor la parametri de intrare, modelele de materiale, geometria și condițiile de margine poate fi, de asemenea investigată prin analize FEM. Deoarece precizia analizei cu elemente finite este sensibilă la finețea modelului de discretizare, programele de analiză FEM permit modificarea tipului de element finit și a dimensiunii elementelor de discretizare pentru a obține rezultate fiabile analizei.

În cadrul studiului au fost analizate o serie de structuri rutiere prin comparația rezultatelor obținute prin utilizarea a două programe de dimensionare (CALDEROM 2000, Alizè2) și unul de modelare a structurilor rutiere (Abaqus/CAE 2020).

În prima parte a capitolului au fost analizate trei structuri rutiere cu ajutorul programului de calcul Calderom 2000, considerat normativ în România și respectiv pe baza programului de calcul Alizè2, acceptat normativ în Franța, în două ipoteze de proiectare: (i) ipoteza straturilor perfect legate și respectiv (ii) în ipoteza straturilor semi-legate caz în care stratul de uzură a fost considerat semi-legat de stratul de legătură la rândul lui semi-legat de stratul superior de fundație. În cazul structurilor rutiere S.R._M.A_R și S.R._M.A_P.6,0, modelele straturilor componente ale mixturilor asfaltice analizate în această primă etapă au preluat modulul de rigiditate al stratului de uzură (modul de elasticitate dinamic) determinat în laborator prin încercarea de întindere indirectă la temperatura de 20°C. Pentru celelalte straturi (stratul de uzură) și straturile structurii S.R._M.A_S au considerat modulul de rigiditate [30] și coeficientului lui Poisson determinate conform specificațiilor din Normativ Indicativ PD 177-2001 [30]. Traficul de calcul corespunde unei clase de trafic greu conform normativului.

Rezultatele obținute cu programele de calcul pentru prima ipoteză a straturilor perfect legate, demonstrează că valorile obținute pentru deformațiile specifice verticale de întindere la baza straturilor bituminoase și deformațiile specifice orizontale de compresiune la nivelul terenului

de fundare au fost similare, oferind valori aproape identice pentru ambele programe utilizate. Creșterea valorilor modului de rigiditate a stratului de uzură conduce la o creștere minoră a valorilor deformațiilor specifice, însă criteriul deformației specifice verticale de întindere admisibile este îndeplinit. Pe de altă parte, valorile deformației specifice de compresiune la nivelul terenului de fundare conduc la scăderea liniară pe măsura creșterii valorii modului de rigiditate a stratului de uzură. Totuși, pentru toate structurile rutiere analizate, criteriile impuse de către PD 177-2001 [30] au fost îndeplinite pentru ipoteza straturilor perfect legate (Figura 6).

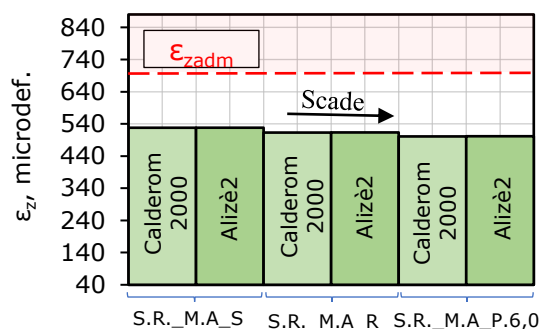


Figura 6. Deformația specifică de compresiune la nivelul terenului de fundare – valori determinate numeric vs. limită admisibilă calculată conform [30].

În ipoteza straturilor semi-legate – în care stratul de uzură este legat 50% de stratul de legătură și respectiv stratul de legătură este 50% legat de stratul superior de fundație, analiza s-a realizat doar cu ajutorul programul de dimensionare Alizè2, programul CALDEROM neavând posibilitatea de a modifica procesul de legare a straturilor structurii rutiere. Reducerea legăturii dintre straturile structurii rutiere conduce la obținerea unor valori ϵ_r și ϵ_z ridicate. Valoarea ϵ_z în cazul structurii S.R._M.A._R depășește valoarea ϵ_{zadm} (Figura 7).

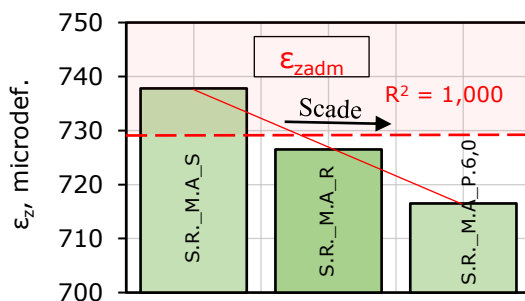


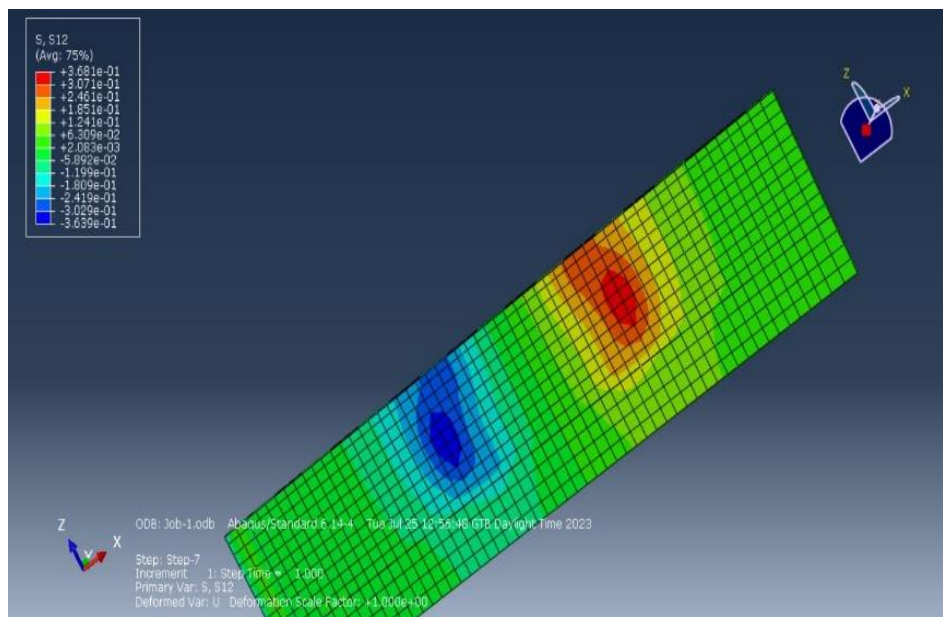
Figura 7. Deformația specifică de compresiune la nivelul terenului de fundare – valori determinate numeric vs. limita admisibilă calculată conform [30].

Pentru structurile rutiere analizate, valoarea RDO depășește valoarea RDO_{adm} , impusă de normativul PD 177. În această situație, doar scăderea traficului de calcul la o valoare medie de jumătate din traficul considerat la proiectare de 0,25 m.o.s. poate conduce la verificarea criteriului privind deformația specifică de întindere admisibilă la nivelul straturilor bituminoase. Astfel, pentru obține o dimensionare adecvată, fie traficul de calcul ar trebui să fie redus fie grosimile straturilor bituminoase ar trebui să fie mai mari.

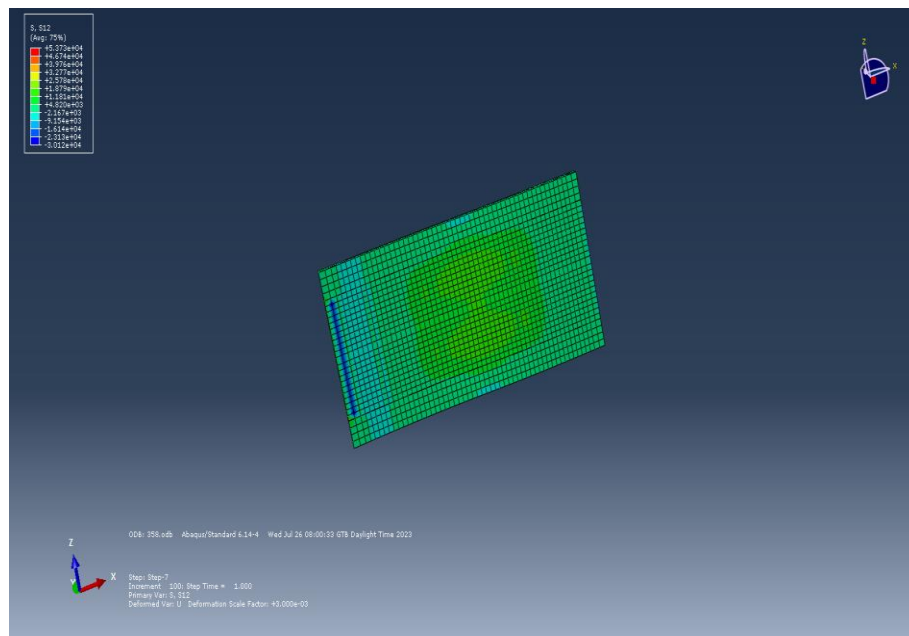
Rezultatele obținute etapa de dimensionare au pus în evidență faptul că o structură rutieră cu deficiențe de aderență între straturile componente nu poate prelua în totalitate traficul de calcul considerat, afectând direct capacitatea portantă a structurii rutiere și ca urmare durata de viață a acestora. Spre exemplu, durata de exploatare a structurilor rutiere a fost considerată inițial de 12 ani, acesta reducându-se la 6 ani ca urmare a creșterii valorilor ratei de degradare prin oboseală și a reducerii numărului de solicitări admisibil. Practic, o legătură parțială de 50% între straturile structurii rutiere conduce la o reducere de cca. 50% a valorii traficului de calcul în vederea verificării criteriilor de dimensionare prevăzute de către PD 177-2001.

Pornind de la dimensionările efectuate cu programele Calderom 2000 și Alizè2, au fost concepute două modele de structuri rutiere, având caracteristicile de deformabilitate și grosimi ale straturilor componente identice cu cele ale structurii S.R._M.A_R, cu ajutorul programului cu elemente finite Abaqus/CAE 2020. Modelul 3D a fost validat pe baza rezultatelor programelor de calcul de dimensionare, și a rezultatelor comparative în ipoteza straturilor perfect legate, rezultatele fiind foarte apropiate de cele ale programelor de calcul.

Pentru a studia efectul diferiților parametri, cum ar fi efectul legăturii dintre straturile de mixtură asfaltică în timpul unei încărcări diferite față de cea standard cu efect static respectiv dinamic, împreună cu efectul unei forțe de frânare asupra structurii rutiere, a fost creat un nou model de structură rutieră, pornind de la modelul FEM validat pe baza programelor de dimensionare. În ipoteza straturilor perfect legate, valorile obținute pun în evidență tendința crescătoare a rezultatelor atât din punctul de vedere al tensiunilor normale, cât și a tensiunilor tangențiale. Introducerea unei forțe suplimentare, cum e cazul forței de frânare orizontale, a condus la creșterea valorilor tensiunilor tangențiale cu efect de compresiune cu cca. 85%, atât la baza stratului de uzură, cât și la suprafața stratului de legătură (Figura 8).



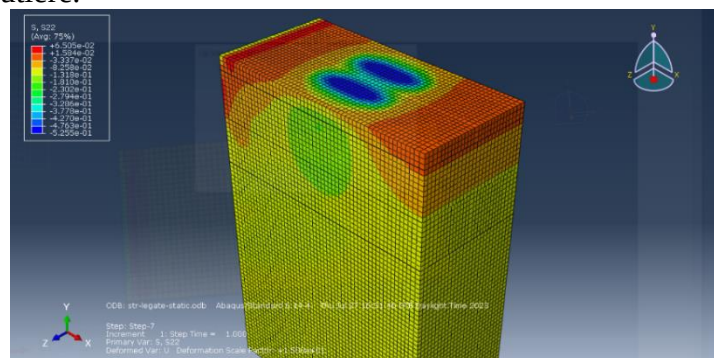
a)



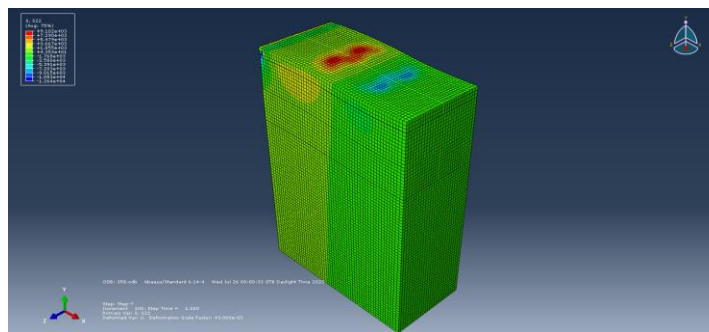
b)

Figura 8. Valorile tensiunilor tangențiale τ_{yz} , – la baza stratului de uzură: a) Încărcare statică; b) Încărcare dinamică + forță de frânare

Referitor la valorile tensiunii normale, acestea prezintă o creștere cu cca. 50% față de valorile inițiale (Figura 9). Pe lângă aceste creșteri ale valorilor tensiunilor tangențiale și normale, introducerea unei forțe de frânare, care practic poate fi considerată ca fiind o forță tangențială, aceasta conduce și la apariția unei tensiuni normale de întindere. Totuși, valorile obținute se încadrează în valorile precizate în literatura de specialitate referitoare la valorile tensiunilor și ale eforturilor tangențiale, indicând efectul favorabil al existenței unei legături corespunzătoare între straturile structurii rutiere.



a)



b)

Figura 9. Valorile tensiunilor normale σ_y - la suprafața stratului de legătură: a) Încărcare statică; b) Încărcare dinamică + forță de frânare

Capitolul cinci prezintă o analiză multicriterială în termeni de dezvoltare durabilă a unor mixturi asfaltice reprezentative. Obiectivul principal al acestui capitol a fost de investigare a impactului potențial asupra mediului înconjurător pentru etapa de producere a unei tone de mixtură asfaltică produsă după diferite rețete și care conține sau nu polimeri. Toate materialele luate în considerare în cadrul prezentului studiu sunt specifice și utilizate în general în industria constructoare de drumuri din România. În total, au fost analizate șase mixturi asfaltice: (i) o mixtură de referință M.A._R.0 și versiunile similare cu adaos de polimeri în diferite procente: M.A._P.2,0; M.A._P.4,0; M.A._P.6,0; M.A._P.8,0; M.A._P.10,0).

Construcția de drumuri este adesea asociată cu emisii de carbon din surse directe și indirecte, în principal din cauza activităților de construcție și de întreținere. În prezent, există o lipsă de repere cuprinzătoare pentru evaluarea ciclului de viață (LCA) în ceea ce privește evaluarea mixturilor asfaltice. Dezvoltarea durabilă se bazează pe trei piloni fundamentali: social, economic și de mediu. Pilonul social vizează îmbunătățirea calității vieții pentru toți cetățenii, prin promovarea justiției sociale, educației, sănătății și echității, inclusiv a impunerilor normative. Pilonul economic se concentrează pe dezvoltarea unui sistem economic eficient și sustenabil, care să permită creșterea economică pe termen lung, să asigure locuri de muncă și să optimizeze utilizarea resurselor. Pilonul de mediu include protejarea ecosistemelor și resurselor naturale, pentru garantarea unui viitor sănătos pentru planetă și pentru generațiile viitoare. În timp ce primii doi piloni sunt mai ușor de evaluat și de integrat în strategiile de dezvoltare, criteriul de mediu rămâne un domeniu în continuă dezvoltare. Deși există deja un interes crescut pentru măsurarea impactului ecologic al diferitelor activități, în prezent se lucrează în continuare la definirea unor metode standardizate și la crearea unor indicatori globali pentru evaluarea acestui pilon.

În ultimii ani, mai multe studii au fost îndreptate spre evidențierea impactului asupra mediului pentru mixturile asfaltice prin realizarea de evaluări ale ciclului de viață (LCA) și/sau evaluarea amprente de carbon prin emisiile de gaze cu efect de seră (GES) [31], [32]. Evaluarea impactului asupra mediului reprezintă procesul prin care sunt furnizate informații cu privire la efectele pe care le are implementarea unui produs /proces asupra mediului înconjurător, conducând la o evidență finală a impactului asupra mediului, bazată pe emisiile evaluate, clasificarea și cumulara rezultatelor. Deciziile luate se bazează pe interpretarea rezultatelor obținute, prin evaluarea impactului acestora, pentru a continua/opri sau ajusta proiectul, procesul, etc. [33].

Fabricarea mixturilor asfaltice conduce la un consum ridicat de energie, deoarece eliberează cantități mari de gaze cu efect de seră (GES) și alți poluanți în atmosferă [34]. Mai mult de 25% din emisiile GES sunt cauzate de utilizarea intensivă a combustibililor fosili în producția

de drumuri din Europa [35]. În întreaga lume, efectele gazelor cu efect de seră asupra mediului și, prin urmare, a schimbării climatice sunt studiate cu mai multă atenție și se caută tehnologii sustenabile de construcție [36], [37], [38], [39].

Analizând rezultatele obținute, se poate concluziona faptul că cel mai mare impact asupra mediului înconjurător, pentru toate cele șase mixturi asfaltice analizate s-a obținut în etapa A1 – etapa de procurare a materialelor componente, urmând mai apoi etapa de producere a mixturilor asfaltice și în final etapa de transport a acestora.

Comparând indicatorii de mediu rezultați, pentru mixtura asfaltică de referință s-a obținut cel mai mic impact asupra mediului, comparativ cu rezultatele obținute pentru mixturile asfaltice cu diferite procente de polimer. Acest lucru s-a datorat temperaturii mai scăzute de fabricare pentru M.A._R.0 cu 20°C mai redusă față de temperatura de producere a mixturilor asfaltice cu adaos polimer. Reducerea temperaturii de fabricare conduce la reducerea energiei necesare fabricării. Față de M.A._R.0, M.A._P.10,0 prezintă o creștere a potențialului de schimbare climatică cu cca. 17%. Atât producerea unei mixturi asfaltice cu polimer, cât și producerea polimerului conduce la un consum mai ridicat de energie (Figura 10).

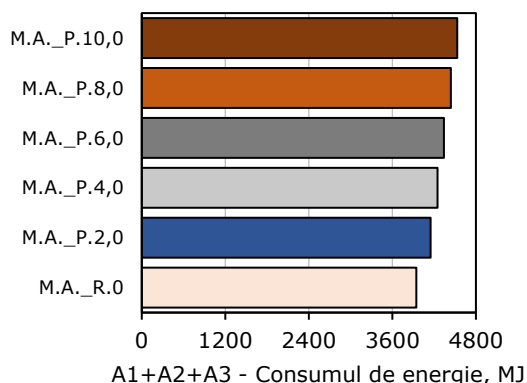


Figura 10. Consumul de energie (etapele A1+A2+A3)

Pe etape separate, cel mai mare consum de energie poate fi observat în etapa A1, pentru mixtura asfaltică cu 10% polimer (M.A._P.10,0), aceasta având o valoare cu cca. 13% peste valoarea energie consumate în cazul mixturii asfaltice de referință. Valorile consumului de energie sunt aproximativ similare pentru toate mixturile asfaltice analizate în etapa A2.

Analiza multicriterială a fost realizată considerând trei cele trei criterii ale dezvoltării durabile: economic, social și respectiv de impact asupra mediului:

- criteriul economic (30%) a fost considerat prin costul de producție;
- criteriul social (50%), integrat prin intermediul valorilor celui mai important parametru normativ - modulul de rigiditate;
- criteriul de mediu (20%) prin analiza de impact asupra mediului, considerată prin cantitățile de CO₂ și respectiv energia utilizată pentru producerea mixturilor asfaltice.

Rezultatele analizei multicriteriale arată că mixtura asfaltică cu procent de 8% polimer a acumulat un scor mai ridicat în urma analizei multicriteriale prin metoda ponderării scorurilor principal datorită criteriului social. Mixturile asfaltice cu polimer (în cazul acestui studiu mixtura asfaltică cu adaos de 8% polimer) este o alternativă mai bună din punct de vedere al durabilității, al comportamentului la temperaturi mai ridicate și la un trafic mai greu. Din punct de vedere al costului total, chiar dacă costul pentru mixtura asfaltică cu polimer este puțin mai ridicat, trebuie

evaluate și costurile legate de întreținerea și reparația mixturilor asfaltice clasice, având în vedere faptul că acestea nu au o rezistență la deformării permanente ridicată care cel mai probabil conduce la o mentenanță la intervale de timp mai mari.

Referințe

- [1] “ESCAP, ‘ESCAP report - Chapter 1 The challenge: sustainable road transport.’ [Online]. Available:” Accessed: Sep. 14, 2023. [Online]. Available: https://www.unescap.org/sites/default/files/roadprice_ch1.pdf
- [2] W. Commission on Environment, “Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4.”
- [3] F. Xu, Y. Zhao, and K. Li, “Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review,” *Materials*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/ma15010110.
- [4] “Pagină Web - Parlamentul European.” Accessed: Feb. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20181212STO21610/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures>
- [5] S. Heydari, A. Hajimohammadi, N. Haji Seyed Javadi, and N. Khalili, “The use of plastic waste in asphalt: A critical review on asphalt mix design and Marshall properties,” *Constr Build Mater*, vol. 309, p. 125185, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125185.
- [6] G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi, and G. Stastna, “A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility,” *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 224, pp. 72–112, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.cis.2015.07.010.
- [7] L. M. B. Costa, H. M. R. D. Silva, J. R. M. Oliveira, and S. R. M. Fernandes, “Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement,” *International journal of pavement research and technology*, vol. 6, no. 4, p. 457, 2013.
- [8] A. Modarres and H. Hamed, “Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes,” *Mater Des*, vol. 61, pp. 8–15, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.046.
- [9] I. A. El-Naga and M. Ragab, “Benefits of utilization the recycle polyethylene terephthalate waste plastic materials as a modifier to asphalt mixtures,” *Constr Build Mater*, vol. 219, pp. 81–90, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.172.
- [10] L. Costa, J. Peralta, J. Oliveira, and H. Silva, “A New Life for Cross-Linked Plastic Waste as Aggregates and Binder Modifier for Asphalt Mixtures,” *Applied Sciences*, vol. 7, no. 6, p. 603, Jun. 2017, doi: 10.3390/app7060603.
- [11] P. Lastra-González, M. A. Calzada-Pérez, D. Castro-Fresno, Á. Vega-Zamanillo, and I. Indacochea-Vega, “Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste,” *Constr Build Mater*, vol. 112, pp. 1133–1140, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.156.
- [12] K.-D. Jeong, S.-J. Lee, and K. W. Kim, “Laboratory evaluation of flexible pavement materials containing waste polyethylene (WPE) film,” *Constr Build Mater*, vol. 25, no. 4, pp. 1890–1894, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.068.
- [13] E. Ahmadinia, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz, and E. Ahmadinia, “Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt,” *Constr Build Mater*, vol. 36, pp. 984–989, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015.
- [14] H. Yu, Z. Zhu, Z. Zhang, J. Yu, M. Oeser, and D. Wang, “Recycling waste packaging tape into bituminous mixtures towards enhanced mechanical properties and environmental benefits,” *J Clean Prod*, vol. 229, pp. 22–31, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.409.
- [15] G. Sarang, B. M. Lekha, G. Krishna, and A. U. Ravi Shankar, “Comparison of Stone Matrix Asphalt mixtures with polymer-modified bitumen and shredded waste plastics,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 17, no. 4, pp. 933–945, Oct. 2016, doi: 10.1080/14680629.2015.1124799.
- [16] C. Brovelli, M. Crispino, J. Pais, and P. Pereira, “Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 77, pp. 117–123, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.060.

- [17] D. Casey, C. McNally, A. Gibney, and M. D. Gilchrist, "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt," *Resour Conserv Recycl*, vol. 52, no. 10, pp. 1167–1174, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.06.002.
- [18] A. Modarres and H. Hamed, "Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET)," *Constr Build Mater*, vol. 68, pp. 259–267, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.054.
- [19] T. Baghaee Moghaddam, M. R. Karim, and T. Syammaun, "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles," *Constr Build Mater*, vol. 34, pp. 236–242, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054.
- [20] Q. Zhang, S. W. Goh, and Z. P. You, "Study on Dynamic Modulus of Waste Plastic Modified Asphalt Mixture Using Waste Plastic Bag Chips," *Adv Mat Res*, vol. 261–263, pp. 824–828, May 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.824.
- [21] M. Nouali, Z. Derriche, E. Ghorbel, and L. Chuanqiang, "Plastic bag waste modified bitumen a possible solution to the Algerian road pavements," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 6, pp. 1713–1725, Aug. 2020, doi: 10.1080/14680629.2018.1560355.
- [22] S. Wu and L. Montalvo, "Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review," *J Clean Prod*, vol. 280, p. 124355, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124355.
- [23] "AND 605 - Mixturi asfaltice executate la cald. Condiții tehnice privind proiectarea, prepararea și punerea în operă," 2016.
- [24] G. Sun, T. Ma, M. Hu, X. Sun, Z. Cao, and R. Zhao, "An evaluation proposal for the fatigue and healing performances of high-viscosity polymer-modified bitumen based on continuous multiple linear amplitude sweep," *Constr Build Mater*, vol. 411, p. 134632, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134632.
- [25] A. Tabaković *et al.*, "Bio-polymer modified bitumen," *Constr Build Mater*, vol. 406, p. 133321, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133321.
- [26] W. Wu, M. C. Cavalli, W. Jiang, and N. Kringos, "Differing perspectives on the use of high-content SBS polymer-modified bitumen," *Constr Build Mater*, vol. 411, p. 134433, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134433.
- [27] S. Werkovits, K. Primerano, M. Bacher, T. Rosenau, B. Hofko, and H. Grothe, "An analytical framework to assess the chemical changes in polymer-modified bitumen upon natural and simulated ageing," *Fuel*, vol. 381, p. 133257, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.fuel.2024.133257.
- [28] N. Esmaeili, M. Z. Alavi, and M. Samadzad, "Evaluation of the impacts of polymeric fibers and modifiers on the fracture properties of asphalt mixtures," *Results in Engineering*, vol. 25, p. 103862, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103862.
- [29] P. T. Marc, "Conceperea și realizarea unor structuri rutiere cu performanțe ridicate," University Politehnica Timisoara, Timisoara, 2011.
- [30] "Indicativ PD 177 - Normativ privind dimensionarea structurilor rutiere suple și semirigide (metoda analitică)," 2001.
- [31] M. Huang, Q. Dong, F. Ni, and L. Wang, "LCA and LCCA based multi-objective optimization of pavement maintenance," *J Clean Prod*, vol. 283, p. 124583, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124583.
- [32] I. C. Martins Vaz, L. N. Antunes, E. Ghisi, and L. P. Thives, "Life Cycle Assessment of Pervious Pavements: Integrative Review and Novel Ideas of Analysis," *Water (Basel)*, vol. 16, no. 10, p. 1403, May 2024, doi: 10.3390/w16101403.
- [33] Andrei-Roman Forton, "Thermomechanical behaviour of bituminous materials including RAP and rejuvenator and environmental impact of their fabrication process.," Université de Lyon; Universitatea Politehnica (Timisoara, Roumanie), Romania, 2021.

- [34] L. P. Thives and E. Ghisi, “Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, pp. 473–484, May 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.087.
- [35] T. Schlegel, D. Puiatti, H.-J. Ritter, D. Lesueur, C. Denayer, and A. Shtiza, “The limits of partial life cycle assessment studies in road construction practices: A case study on the use of hydrated lime in Hot Mix Asphalt,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 48, pp. 141–160, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.08.005.
- [36] H. K. Shanbara *et al.*, “The future of eco-friendly cold mix asphalt,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 149, p. 111318, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111318.
- [37] X. Li, F. Yuan, J. Shen, J. Jia, and J. Gao, “Application of wood powder for asphalt CO2 emission reduction,” *J Clean Prod*, vol. 375, p. 134127, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134127.
- [38] I. Elnaml *et al.*, “Recycling waste plastics in asphalt mixture: Engineering performance and environmental assessment,” *J Clean Prod*, vol. 453, p. 142180, May 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142180.
- [39] S. Salehi, M. Arashpour, J. Kodikara, and R. Guppy, “Comparative life cycle assessment of reprocessed plastics and commercial polymer modified asphalts,” *J Clean Prod*, vol. 337, p. 130464, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130464.