

RELEVANTNE KARAKTERISTIKE TERMOSTABILNE MREŽE ZA ARMIRANJE ASFALTA

Dragan Stojnić¹

¹ Institut za puteve a.d. Beograd - Odeljenje za projektovanje i ispitivanje kolovoznih konstrukcija, Bul. Peka Dapčevića 45, Beograd, Srbija

Rezime: Pri projektovanju rehabilitacija fleksibilnih kolovoznih konstrukcija sa asfaltnim zastorom, jedna od mogućih mera jeste primena termostabilnih mreža za armiranje asfalta. Njihova upotreba omogućava produženje životnog veka asfaltnih slojeva kolovoza, uz značajne ekonomske i ekološke prednosti. Mehanizam delovanja ovih mreža zasniva se na kombinaciji uklještenja (mehaničke adhezije), (hemijske) adhezije i zatezne čvrstoće. U pogledu izbora odgovarajućih karakteristika armaturnih mreža, kako bi se postigao maksimalan doprinos asfaltnoj konstrukciji, objavljeni su brojni stručni radovi. Ovaj rad bavi se analizom karakteristika koje utiču na interakciju armaturne mreže sa asfaltnim slojem pod dinamičkim opterećenjem, kao i laboratorijskim ispitivanjima - pre svega dilatacije zatezanja ϵ_6 (Epsilon 6) i smanjenja zatezne čvrstoće nakon ugradnje. Rezultati sprovedenih ispitivanja ukazuju na ostvarene benefite i omogućavaju pouzdanu ocenu ponašanja spregnutog sistema (asfaltni sloj + armaturna mreža) u uslovima dinamičkog opterećenja karakterističnog za kolovozne konstrukcije. Razmatrane karakteristike predstavljaju jedan od ključnih parametara u postupku racionalnog dimenzionisanja kolovoznih konstrukcija uz upotrebu armaturne mreže. Sprovedena analiza može poslužiti kao smernica projektantima pri izboru odgovarajućeg tipa mreža za armiranje asfaltnih kolovoznih zastora, kao i investitorima prilikom definisanja projektnih zahteva i uslova u tenderskoj dokumentaciji.

Ključne reči: Termostabilna asfaltna armaturna mreža, spregnuti sistem (asfaltni sloj + armaturna mreža), Epsilon 6, gubitak zatezne čvrstoće, racionalno dimenzionisanje, projektni zadatak, tenderska dokumentacija

RELEVANT CHARACTERISTICS OF THERMOSTABLE ASPHALT REINFORCEMENT GRIDS

Dragan Stojnić¹

¹ Highway Institute a.d. Belgrade - Department for Pavement Design and Testing, Bul. Peka Dapčevića 45, Beograd, Srbija

Abstract: In the rehabilitation design of flexible pavement with asphalt wearing course, one of the potential measures involves the application of thermostable grids for asphalt layer reinforcement. Their use extends the service life of asphalt layers while providing significant economic and environmental benefits. The functional mechanism of these grids is based on a combination of interlock (mechanical adhesion), chemical adhesion, and tensile strength. Numerous technical papers have been published regarding the selection of optimal grid characteristics to maximize their contribution to pavement performance. This paper analyzes the key properties that affect the interaction between the reinforcement grid and the asphalt layer under dynamic loading, as well as relevant laboratory tests - primarily tensile strain elongation (Epsilon 6) and tensile strength reduction after installation. The results of the conducted tests demonstrate measurable performance benefits and provide a reliable assessment behavior of the combined asphalt layer/reinforcement grid system under dynamic loads conditions typical for pavement structures. The analyzed characteristics represent one of the key parameters in the process of rational computing of pavement with the use of reinforcing grids. The conducted analysis may serve as a guideline for designers in selecting an appropriate type of grids for asphalt pavement reinforcement, as well as for investors in defining the terms of reference and requirements in tender documentation.

Keywords: Thermostable asphalt reinforcement grids, asphalt layer/reinforcement grid composite system, Epsilon 6, tensile strength reduction, rational computing, terms of reference, tender documentation

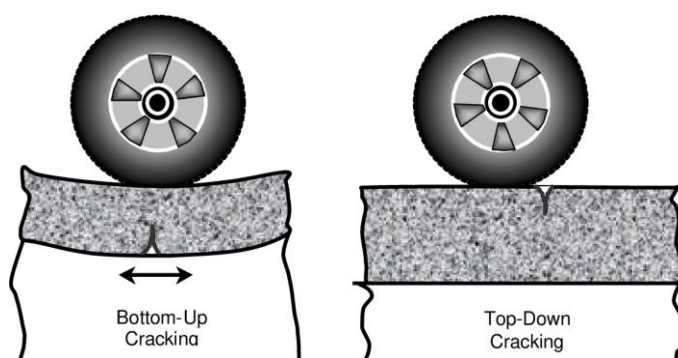
1. UVOD

Armiranje podrazumeva ugradnju geosintetičkih proizvoda u bitumenom vezane slojeve kolovoza radi unapređenja njihovih strukturnih karakteristika, pre svega povećanja otpornosti na zamor i smanjenja pojave reflektovanih pukotina, čime se produžava životni vek asfaltnih kolovoznih zastora [1], [2]. Termin "armiranje" usvojen je od strane radnih grupa ISO Tehničkog komiteta za geosintetiku TC 221 [3] za projektovanje uz primenu geosintetika i primenjuje se u smernicama TG3 komiteta [4], čime je obezbeđena međunarodna terminološka usklađenost. Iako upotreba termostabilnih armaturnih mreža kao međusloja u asfaltnom zastoru u projektovanju, rehabilitaciji i izgradnji kolovoza postaje sve češća, one i dalje izazivaju nedoumice u pogledu izbora vrste i tipa ojačanja, mesta i položaja ugradnje, mehanizma dejstva i načina proračuna u odnosu na klasična rešenja. Treba napomenuti da je danas na tržištu dostupan veliki broj različitih tipova armaturnih mreža, koji, iako većina pozitivno utiče na osobine asfaltnih slojeva, značajno variraju po karakteristikama, ponašanju pod opterećenjem i efikasnosti samog spregnutog sistema (asfalt + mreža). U radu su date jasne smernice, dominantno zasnovane na Australijskim i Južnoafričkim normativima i preporukama iz literature. Cilj ovog rada je da projektantima pruži smernice za izbor odgovarajućeg tipa mreža i podršku u projektovanju. Pre razmatranja karakteristika i mehanizma delovanja armaturnih mreža, kao i njihove efikasnosti, neophodno je analizirati osnovna svojstva asfaltnog materijala i njegov dinamički odgovor na opterećenje. Posebnu pažnju treba posvetiti mehanizmima nastanka i propagacije pukotina, imajući u vidu da je krajnji cilj ostvarivanje optimalnog sadejstva između asfaltnog sloja i armaturne mreže u preraspodeli opterećenja kojima je izložena kolovozna konstrukcija. Rad predstavlja pregled postojećih istraživanja i stručnih smernica, pri čemu su korišćene preporuke i kriterijumi preuzeti iz australijskih i južnoafričkih normativa i tehničke literature. Cilj ovog rada je da projektantima pruži smernice za izbor odgovarajućeg tipa mreža i podršku u projektovanju.

2. DINAMIČKI ODGOVOR ASFALTNOG SLOJA NA OPTEREĆENJE

2.1 Pojava pukotina u asfaltnom sloju

Asfaltni kolovozni zastori su izloženi negativnom uticaju opterećenja teških vozila (dinamičko opterećenje) i uticaju temperature (velike temperature oscilacije), koji u sadejstvu uzrokuju pojavu trajnih deformacija. U tim slojevima javljaju se naponi (dilatacije) smicanja i zatezanja koje asfaltni slojevi ne mogu da izdrže, što dovodi do formiranja pukotina koje se s vremenom šire i uzrokuju oštećenja. Pojava pukotina u zastorima asfaltnih kolovoznih konstrukcija predstavlja karakteristično ponašanje asfaltnog sloja tokom eksploatacije. Dva dominantna tipa pukotina usled zamora su termičke (top-down) pukotine, koje nastaju u habajućem sloju i šire se od površine nadole, i reflektovane (bottom-up) pukotine, koje potiču iz nosećeg sloja i propagiraju ka površini kolovoza.

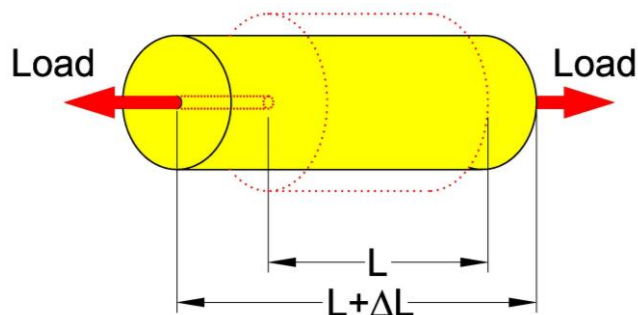


Slika 1: Pukotine od zamora u asfaltnom sloju, reflektovane (bottom-up) i termičke (top-down) pukotine [5]

Sa ciljem jasnijeg sagledavanja mehanizma nastanka i razvoja (bottom-up i top down) pukotina, u laboratoriji je izvršeno ispitivanje asfaltnih gredica (uzoraka) koje su izložene naponima zatezanja. Utvrđeno je da reflektovane (bottom-up) pukotine nastaju pri znatno manjim naponima zatezanja nego što je to slučaj kod termičkih top-down pukotina, jer se razvijaju iz već postojećih diskontinuiteta u nosećem sloju, gde koncentracija napona na vrhu pukotine omogućava njeno brzo širenje pri relativno niskim opterećenjima. Zbog toga su reflektovane (bottom-up) pukotine merodavne pri analizi efektivnosti armiranja primenom termostabilnih mreža.

2.2 Horizontalna dilatacija zatezanja asfaltnog sloja

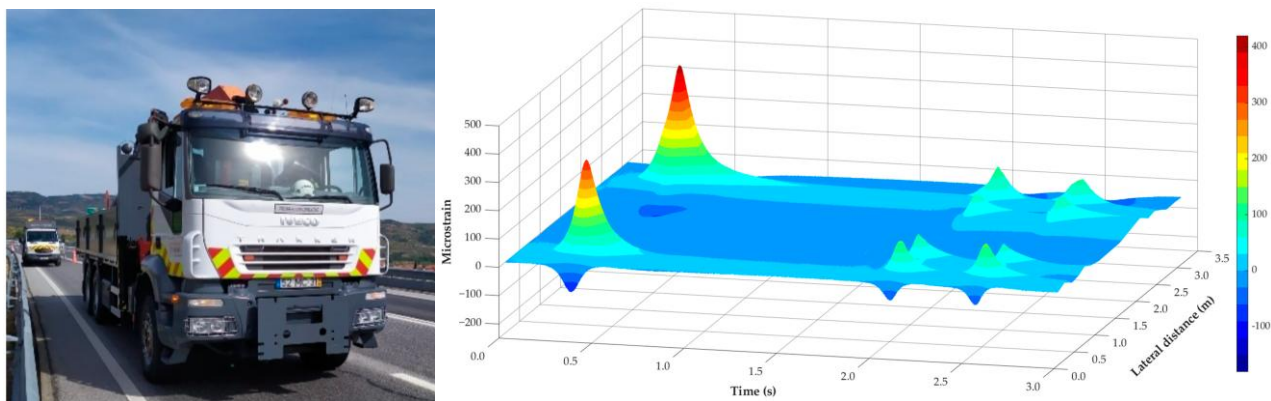
Pre bilo kakve dalje analize, neophodno je najpre precizno definisati pojam dilatacije. Dilatacija (eng. strain) u mehanici materijala predstavlja relativnu meru promene dimenzija ili oblika tela usled dejstva napona (sile). Definiše se kao odnos promene dužine i početne dužine posmatranog elementa. Reč je o bezdimenzionalnoj veličini (najčešće se izražava u procentima (%) ili u mikrojedinicama (microstrain)), koja opisuje (stepen) deformacije materijala, a ne intenzitet sile koja je tu deformaciju izazvala. Ona je ključna za razumevanje kako se materijal ponaša pod opterećenjem, posebno u vezi sa reološko-dinamičkom analizom. U analizi ponašanja asfaltnog sloja, horizontalna dilatacija zatezanja u donjem vlaknu predstavlja jedan od osnovnih projektnih kriterijuma za procenu nastanka pukotina usled zamora. Dilatacija zatezanja (ϵ) je odnos izduženja (ΔL) i prvobitne dužine (L) i kao štp je već rečeno bezdimenziona je veličina ($\epsilon = \Delta L/L$, μstrain ili $\mu\text{m/m}$). Dilatacija od 0.01% ekvivalentna je 100 microstrain ($\mu\epsilon$).



Slika 2: Šematski prikaz dilatacije zatezanja

2.3 Praćenje dilatacija asfaltnog sloja u eksploataciji

Radi dobijanja radnih dijagrama dilatacija asfaltnog sloja koji što verodostojnije opisuju njegovo stvarno ponašanje pod opterećenjem teretnih vozila, sprovodi se praćenje dinamičkog odziva asfaltnog sloja. Primena savremenih optičkih senzora (dilatometara), ugrađenih u kolovoznu konstrukciju, omogućava kontinuirano merenje horizontalnih dilatacija na dnu asfaltnog zastora nakon prolaska teretnih vozila. Ne ulazeći detaljno u metodologiju merenja, u nastavku su prikazane očitane vrednosti horizontalnih dilatacija zatezanja registrovanih nakon prelaska troosovinskog vozila bruto mase 15 t [6].

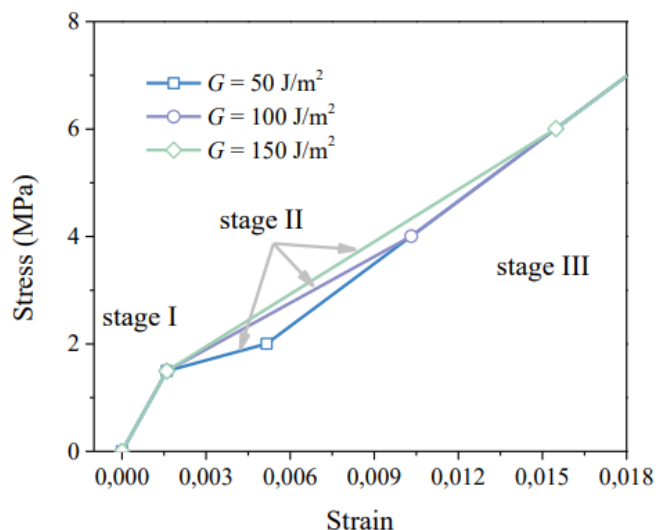


Slika 3: Izgled predmetnog vozila i vrednosti izmerenih zateznih dilatacija (Rebello i ost. 2010) [6].

Monitoring horizontalnih dilatacija zatezanja ima za cilj utvrđivanje realnog opsega dilatacija na dnu asfaltnog zastora u stvarnim eksploatacionim uslovima, i predstavlja osnovu za procenu zamora kolovozne konstrukcije. Rezultati merenja pokazuju da se pri prolasku teretnog vozila bruto mase 15 t dilatacije zatezanja (ϵ_T) na dnu asfaltnog zastora kreću u opsegu $\epsilon_T = 300 - 400 \mu\text{strain}$ (ekvivalentno dilataciji od 0.03 - 0.04 %). Ove vrednosti važe za konkretan tip opterećenja, dok bi različite karakteristike vozila (masa, pritisak u pneumaticima) i kolovozne konstrukcije (debljina i modul krutosti slojeva) uslovile drugačije rezultate. Međutim, generalno posmatrano, maksimalne vrednosti dilatacije zatezanja na dnu asfaltnog sloja, u eksploataciji najčešće ne prelaze vrednost od 1000 μstrain (0.1 %).

2.4 Uticaj naponskog stanja na pojavu pukotina u asfaltnom sloju

U cilju boljeg razumevanja mehaničkog ponašanja asfaltnog sloja, potrebno je sagledati vezu između dilatacije asfalta i naponskog stanja kome je asfalt izložen. Naponsko stanje u kolovoznoj konstrukciji značajno utiče na razvoj deformacija. Analiza mehaničkih karakteristika asfaltnog uzorka, u oblasti tzv. "ograničenog" loma, koristi se za dobijanje što približnijih vrednosti napona i dilatacija, s ciljem određivanja njihovih graničnih vrednosti. Makroskopska veza između napona (stress) i dilatacije (strain) asfaltnih uzoraka (gredica) prikazana je na narednoj slici [7].



Slika 4: Kriva zavisnosti napona i deformacija asfaltna mešavine sa različitim energijama loma (disertacija Fan. Z 2021) [7]

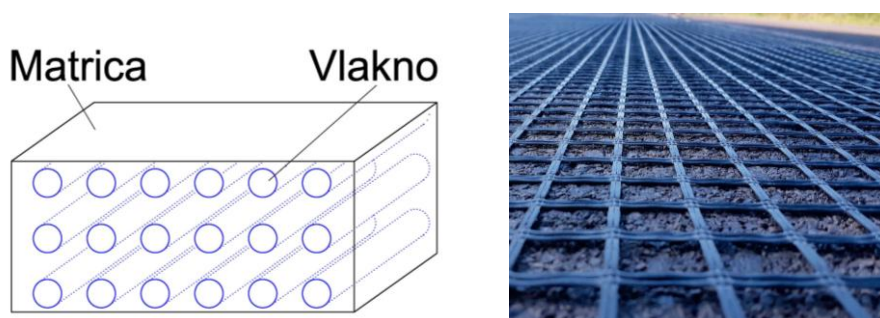
Na osnovu prikazanog dijagrama (napona/dilatacija), mehanizam nastajanja i razvoja pukotine u asfaltnom uzorku može se generalno podeliti na tri faze.

- **I - Faza inicijacije**, počinje mikro plastičnom deformacijom na vrhu pukotine. U ovoj fazi dolazi do postepenog smanjenja krutosti materijala usled formiranja mikro pukotina
- **II - Faza propagacije (razvoja)**, nastaje spajanjem mikro pukotina u dominantne makro pukotine. U ovoj fazi, odgovor materijala je dominantno linearno elastičan, jer su plastične deformacije ograničene
- **III - Faza oštećenja**, nastupa kada elastična mehanika loma postaje neprimenljiva zbog širokih plastičnih zona. Nekontrolisano napredovanje pukotina ubrzava degradaciju materijala i dovodi do strukturnog loma (zamora)

U vezi sa prikazanim, II faza (razvoja) pukotine, koja se odvija u okvirnom opsegu napona $\sigma = 1.5 - 4.0 \text{ MPa}$ i dilatacija $\epsilon = 0.002 - 0.012$ (ekvivalentno izduženju od 0.2 - 1.2 %), predstavlja fazu u kojoj dolazi do smanjenja krutosti sloja usled razvoja makro pukotina u asfaltu. Ova faza (faza II) je ključna za definisanje karakteristika armaturne mreže, jer se upravo u tom domenu naponsko-deformacionog stanja najjasnije sagledava njen doprinos u pogledu nosivosti, krutosti, kontrole pukotina i sposobnosti preuzimanja napona zatezanja.

3. KONCEPT KOMPOZITA OJAČANIH VLAKNIMA - ASFALTNE ARMATURNE MREŽE

Armaturene asfaltne mreže spadaju u klasu kompozita ojačanih vlaknima. Vlakna čine prekidnu i disperznu fazu, dok matrica čini neprekidnu fazu kompozitnog materijala. Matrica ima ulogu da prenosi spoljna opterećenja na vlakna i da obezbijedi potrebnu plastičnost i duktilnost, kao i sposobnost oblikovanja kompozitnog materijala. Takođe, uloga matrice je da štiti vlakna od negativnog hemijskog spoljašnjeg uticaja. Vlakna služe da nose opterećenje i mogu imati različit raspored i orijentaciju, što ima veliki uticaj na ukupnu čvrstoću vlaknasto ojačanih kompozitnih materijala. Neprekidna jednosmerno orijentisana vlakna pogodna su kod kompozita koji su jednoosno aksijalno opterećeni na zatezanje, pri čemu se pravac sila opterećenja i vlakana poklapaju [8], što je i slučaj kod armaturnih asfaltnih mreža [9]. Intenzitet veze između sastavnih elemenata definiše čvrstoću vlaknasto ojačanih kompozitnih materijala. Kako matrica poseduje elastična svojstva, intenzitet njene deformacije određuje vrednost čvrstoće kompozita u celini. Zbog ove činjenice, stvarna zatezna čvrstoća kompozita skoro uvek je manja od vrednosti izračunate po zakonu mešanja (vlakno + matrica).

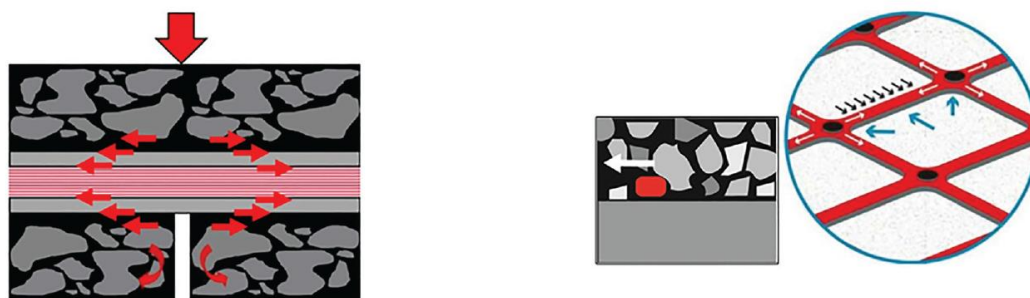


Slika 5: Prikaz vlaknasto ojačanih kompozita (Bajić 2024) i izgled asfaltne armature mreže tokom ugradnje (ADFORS 2025)

3.1 Uloga i mehanizam delovanja armaturnih mreža

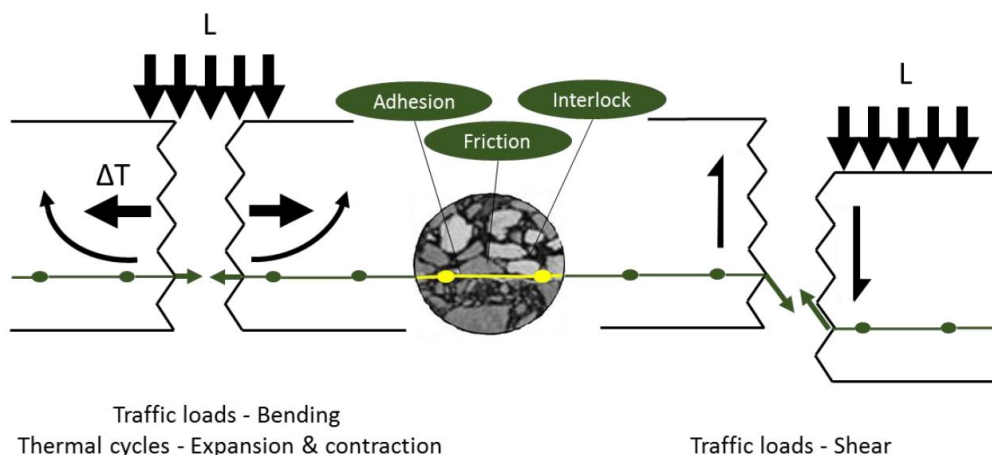
Uloga armaturene mreže ogleda se u tome što pri dejstvu saobraćajnog opterećenja u početnoj fazi (inicijacije) preuzima naprezanja uz minimalne deformacije koje se ne uočavaju u asfaltu i time doprinosi povećanju stabilnosti sloja. Sa porastom opterećenja mreža mora imati deformaciona svojstva približno jednaka svojstvima asfalta kako bi delovala zajednički sa njim, čime se dodatno povećava stabilnost sloja i smanjuje pojava deformacija. Naponi zatezanja i smicanja u asfaltnim slojevima doprinose nastanku pukotina, koje je neophodno da preuzme odgovarajući materijal poput armaturene mreže. Njena primena omogućava povezivanje obe strane pukotine, smanjuje napone i deformacije u zoni vrha pukotine, ograničava horizontalna i vertikalna pomeranja i usporava njeno dalje širenje. Zbog visoke zatezne čvrstoće, opterećenje se raspodeljuje na veću površinu, čime se odlaže reflektovanje pukotina u novi asfaltni sloj i povećava dopuštena horizontalna dilatacija, što doprinosi većoj trajnosti asfaltnog zastora. Efektivnost armiranja termostabilnom mrežom zasniva se na kombinaciji:

- mehaničkog uklještenja (interlocking) - putem uklještenja agregata asfaltne mešavine u otvore (okca) mreže, odnosno rebra i čvorove, ostvaruje se ankerisanje mreže unutar asfaltne matrice i omogućava efikasan prenos opterećenja sa asfalta na mrežu
- hemijske adhezije (adhesive shear bonding) - zahvaljujući kvalitetnom (stabilnom) zaštitnom premazu armaturene mreže omogućava se formiranje čvrste hemijske veze sa površinom agregata
- zatezne čvrstoće - koja definiše kapacitet armature da preuzme napone zatezanja nakon pojave pukotina i da uspori njihovo dalje širenje



Slika 6: Šematski prikaz prenosa opterećenja "asfalt/mreža" putem adhezije (levo) i putem horizontalnog uklještenja (desno) [10]

U skladu sa opisanim mehanizmom, uvođenje armaturne mreže u situaciji kada postoji postojeća pukotina ili diskontinuitet smanjuje koncentraciju napona na vrhu pukotine. Pored toga, pod dejstvom smičućih sila, normalna sila koju stvara pravilno ankerisana armaturna mreža indirektno generiše trenje duž ivica pukotine, čime se povećava uklještenje agregata između dve strane pukotine (de Bondt, 2009).

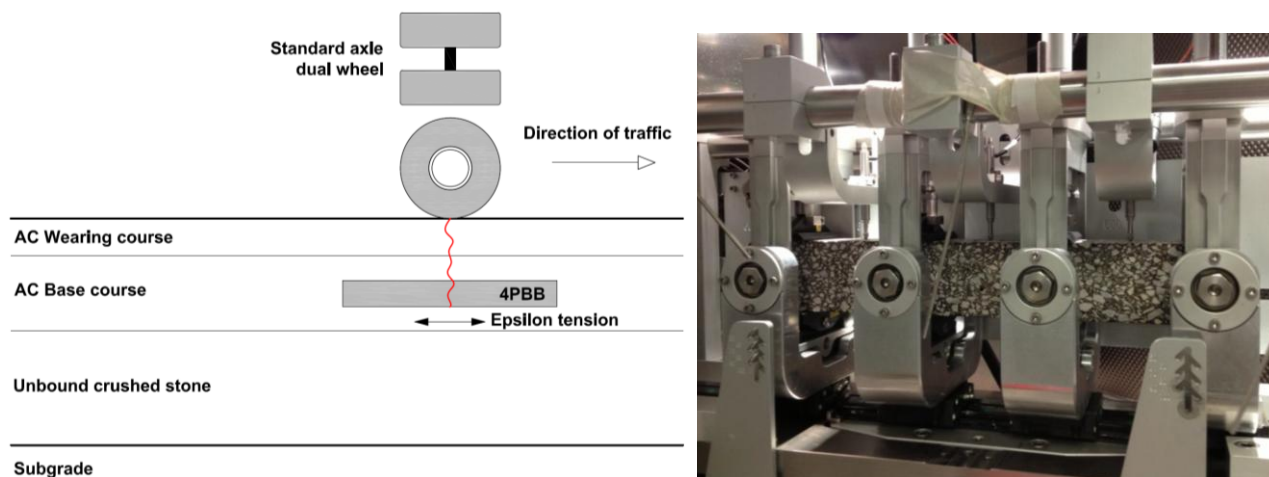


Slika 7: Prikaz mehanizma ojačanja asfalta za različite režime reflektovanih pukotina (TG3 Committee 2020) [4]

3.2 Ispitivanje asfaltnih uzoraka na zamor 4PBB - Epsilon 6 dilatacija

U slučaju kratkotrajnih učestalih apliciranja napona, što je slučaj kod dinamički opterećenih kolovoznih konstrukcija, granica elastičnosti materijala se smanjuje sa povećavanjem broja ponavljanja opterećenja. Ovu osobinu manje ili više ispoljavaju svi elastični materijali, što je pojava poznata kao "zamor" materijala. Prekoračenje dovodi do nastajanja pukotina usled zamora. Otpornost asfaltnih mešavina na zamor ispituje se u laboratorijskim uslovima primenom testa savijanja gredice u četiri tačke (4 Point Bending Beam - 4PBB) [11]. Rezultat 4PBB ispitivanja zamora u velikoj meri odražava stvarno ponašanje asfaltnog zastora pod realnim opterećenjem, što je podstaklo istraživače da pristupe ovom testu sa više fenomenoloških aspekata i pokušaju da identifikuju različite procese koji se odvijaju tokom ispitivanja.

Jedan od ključnih kriterijuma za dimenzionisanje kolovozne konstrukcije i proračun trajnosti (životnog veka) jeste da horizontalna dilatacija zatezanja na dnu asfaltnog sloja (ϵ_T) ne prekorači granicu zamora, odnosno dozvoljenu vrednost dilatacije zatezanja. Laboratorijskim ispitivanjem 4PBB pod jasno određenim uslovima (frekvencija i temperatura) omogućeno je određivanje dilatacije zatezanja nakon nakon 10^6 ciklusa opterećenja (ϵ_6). Dilatacija ϵ_6 predstavlja ključni ulazni podatak koji se uzima u obzir pri dimenzionisanju asfaltnih kolovoznih konstrukcija u Francuskoj i posebno je značajna pri proučavanju efekta armiranja primenom termostabilnih mreža, pri čemu da bi se odredio uticaj (efektivnost i efikasnost) prisustva mreže, upoređuju uzorci sa i bez ojačanja mrežom.



Slika 8: Osnovna logika ispitivanja zamora asfaltnih uzoraka i izgled aparature 4PBB testa [11]

3.3 Efikasnost armaturne mreže - koeficijent armiranja

Efikasnost mreže i kritična dilatacija koja se koristi u projektovanju kolovoznih konstrukcija zavise od korišćenih kriterijuma analize laboratorijskih podataka [12], [13]. Kako bi se odredio računski uticaj prisustva armaturne mreže na otpornost na zamor, uveden je FRIF (Fatigue Resistance Improvement Factor), pri čemu se koriste kritične dilatacije ojačanog i neojačanog seta asfaltnih uzoraka (primenom opita savijanja gredice u četiri tačke 4PBB). Za (praktičniju) primenu u proračunu životnog veka (prema metodologiji LCPC-Setra) uvodi se koeficijent efikasnosti armiranja (k_{ARM}), koji predstavlja odnos kritičnih dilatacija ojačanih i neojačanih uzoraka. Konkretno, FRIF i k_{ARM} , se izračunavaju prema sledećem izrazu:

$$FRIF = \frac{\varepsilon_6^R - \varepsilon_6^{UR}}{\varepsilon_6^{UR}} \times 100\% \quad \text{ili} \quad k_{ARM} = \frac{\varepsilon_6^R}{\varepsilon_6^{UR}}$$

gde su:

ε_6^R - kritična vrednost dilatacije seta uzoraka ojačanih mrežom (μstrain)

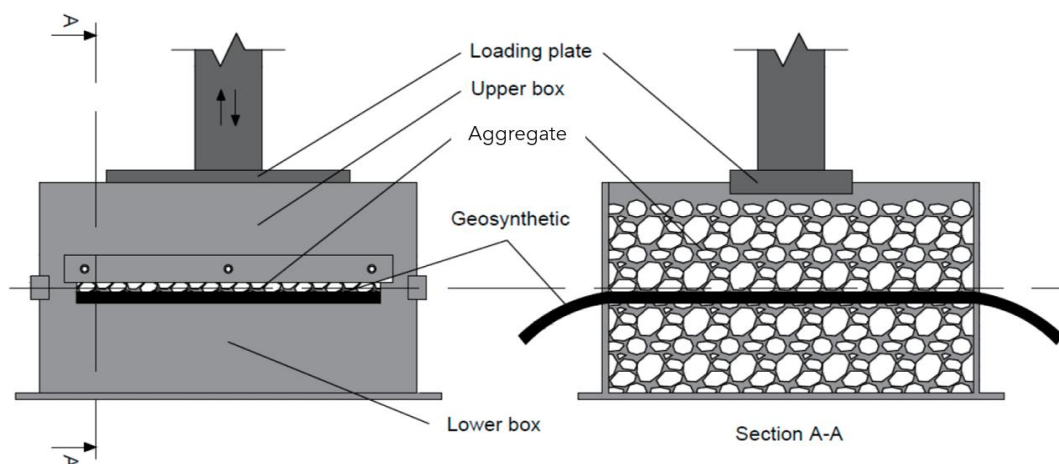
ε_6^{UR} - kritična vrednost dilatacije seta uzoraka bez ojačanja (μstrain)

Pozitivne vrednosti FRIF-a ($k_{ARM} > 1,0$) ukazuju da prisustvo ojačanja pozitivno utiče na zamor asfaltnih uzoraka, tj. produžilo je njihov vek trajanja, dok negativne vrednosti FRIF-a ($k_{ARM} < 1,0$) znače da je efekat ojačanja nepovoljan. Pored laboratorijski određenih FRIF i k_{ARM} , neophodno je što realnije proceniti ponašanje mreže nakon ugradnje, uzimajući u obzir sve rizike koje taj proces nosi, odnosno potencijalna oštećenja i umanjene njenih mehaničkih karakteristika tokom izvođenja radova. Zbog toga se u metodologiji dimenzionisanja uvodi projektna vrednost koeficijenta efikasnosti armiranja (k_{ARM_PROJ}), koja kvantifikuje smanjenje zatezne čvrstoće mreže usled oštećenja nastalih tokom procesa ugradnje. Vrednost umanjene zatezne čvrstoće armaturne mreže zavisi od više faktora, uključujući vrstu materijala mreže, veličinu otvora i karakteristike asfaltne mešavine (maksimalno zrno, sadržaj veziva). Na osnovu dostupnih laboratorijskih ispitivanja koja simuliraju oštećenje geosintetičkog materijala tokom ugradnje prema standardu EN ISO 10722, prosečno umanjene zatezne čvrstoće armaturne mreže kreće se u rasponu od 10% do 20%. S tim u vezi, projektna vrednost koeficijenta efikasnosti armiranja, uzimajući obzir umanjene zatezne čvrstoće mreže nakon ugradnje od na primer 10%, jednaka $k_{ARM_PROJ} = k_{ARM} \cdot 0.9$. Treba napomenuti da stvarni efekat armiranja, pored saznanja o stepenu umanjene zatezne čvrstoće nakon ugradnje zavisi i od dubine ugradnje armaturne mreže.

Naime, armaturnu mrežu je efikasnije ugraditi na većoj dubini, odnosno što niže u odnosu na površinu asfaltnog zastora, jer se sa povećanjem dubine ugradnje povećava i efektivna debljina asfaltnih slojeva koji zajednički učestvuju u prihvatanju i raspodeli saobraćajnog opterećenja, čime se ostvaruje izraženiji efekat armiranja i povoljniji uticaj na produženje eksploatacionog veka asfaltnog zastora, uz pretpostavku linearne zavisnosti između životnog veka i debljine asfaltnog sloja iznad armaturne mreže. Ova zavisnost detaljno je obrazložena u radu koji se bavi postupkom racionalnog dimenzionisanja, predstavljenom na stručnom skupu Ceste 2022 [16].

3.4 Ispitivanje gubitka zatezne čvrstoće mreže tokom ugradnje - EN ISO 10722:2020

Za što preciznije parametrisanje armaturne mreže u spregnutom sistemu (asfalt + mreža), neophodno je utvrditi stepen umanjenja zatezne čvrstoće tokom i nakon ugradnje. Standardom EN ISO 10722 [14] definisana je metoda ispitivanja koja ocenjuje mehaničko oštećenje pod ponovljenim opterećenjem izazvano zrnastim materijalom (agregatom), čime se nastoji što realnije simulirati oštećenje geosintetičkih materijala tokom ugradnje. Ne ulazeći detaljno u postupak ispitivanja, treba napomenuti da je ovaj standard u periodu od 2007. do 2020. godine pretrpeo značajne proceduralne izmene. U poređenju sa verzijom iz 2007. godine, važeći standard iz 2020. godine preciznije definiše opterećenje i trajanje ispitivanja, vrstu kamenog agregata kao i dimenzije uzorka, čime rezultati postaju znatno relevantniji i pouzdaniji za proračun trajnosti asfaltnih slojeva. Upravo zbog ovih unapređenja, standard EN ISO 10722 iz 2020. godine predstavlja jedini merodavan okvir za prikaz gubitka zatezne čvrstoće.



Slika 9: Šematski prikaz opreme za ispitivanje mehaničkog oštećenja pod dejstvom ponovljenog opterećenja prema EN 10722 [15]

3.5 Proračun trajnosti (životnog veka) kolovozne konstrukcije

Analitičkim postupkom primenom specijalizovanih programskih paketa možemo sračunati trajnost (životni vek) asfaltnog sloja kolovozne konstrukcije. Važno imati u vidu da su ulazni podaci idealizovani i da odstupanja praktičnih i računarskih rezultata moraju biti "pokrivena" koeficijentima korekcije. U tom smislu, najoptimalniji pristup je primena analitičkog postupka prema metodologiji Francuske Centralne laboratorije LCPC-Setra [16], uz korišćenje rezultata 4PBB ispitivanja. Na taj način se trajnost asfaltnog zastora, bez značajnog komplikovanja samog postupka proračuna primenom mreže, može izraziti eksponencijalnom funkcijom zamora. Detaljan prikaz postupka racionalnog dimenzionisanja predstavljen je na stručnom skupu Ceste 2022, održanom u Rovinju [17], te se, bez detaljnijeg ulaženja u objašnjenje samog postupka proračuna, u nastavku daje kratak opis ključnih parametara.

$$\mathcal{E}_{t\max} = (NE/10^6)^b \cdot k_S \cdot k_R \cdot k_C \cdot k_T \cdot k_{ARM_PROJ} \cdot \mathcal{E}_6(10^0C, 25\text{ Hz})$$

- NE - trajnost (životni vek) asfaltnog sloja kolovozne konstrukcije izražen brojem prelaza standardne osovine
- $\mathcal{E}_6$ - dilatacija zatezanja (μstrain) nakon 10^6 ciklusa asfaltnog uzorka određena u laboratoriji (na 10^0C i 25 Hz)
- $\beta = -1/b$ - nagib krive zamora asfaltnog materijala
- k_T - koeficijent korekcije za transponovanje ispitivanja zamora asfaltnih materijala uslovima definisanim u laboratoriji
- k_S - koeficijent korekcije dozvoljene dilatacije zatezanja u skladu sa nosivošću posteljice
- k_R - koeficijent korekcije u odnosu na disperziju rezultata testova zamora i promenu debljine asfaltnog sloja
- k_{ARM_PROJ} - koeficijent armiranja (projektni) predstavlja uvećanje dilatacije zatezanja ($\mathcal{E}_6$) primenom armaturne mreže

4. RELEVANTNE KARAKTERISTIKE (SVOJSTVA) ARMATURNE MREŽE

Poznavanje mehaničkih svojstava armature mreže važno je za selekciju mreže pri izradi ojačanja asfaltnih kolovoznih konstrukcija, jer ova svojstva određuju mogućnost ili ograničenja njene primene, uz naravno prethodno definisanje mreže kao optimalnog rešenja. Važna mehanička svojstva materijala su:

- čvrstoća - otpornost materijala prema plastičnom deformisanju
- žilavost - sposobnost materijala da tokom deformisanja pre loma apsorbuje određeni nivo energije
- otpornost na zamor - mreža ne doživljava lom ni pri dovoljnom broju ciklusa njenog radnog opterećenja
- puzanje - mreža ne doživljava lom pri istovremenom dejstvu dva činioca (statičkog opterećenja i temperature)

U kontekstu asfaltnih armaturnih mreža, pri čemu su zatezanje i savijanje presudni oblici naprezanja, ključna su dinamička ispitivanja zatezanjem i savijanjem (4PBB), koja određuju otpornost i deformabilnost mreže i spregnutog sistema (asfalt + mreža), pri čemu mreža mora imati dovoljnu temperaturnu otpornost kako bi zadržala mehanička svojstva pri ugradnji. Nosivost armature mreže, u smislu efektivnosti i efikasnosti, mora biti osigurana odgovarajućim faktorom sigurnosti kako bi pri izduženju od 2 % mogla preuzeti što veću silu i ojačati asfaltni sloj. Faktor sigurnosti obezbeđuje da naponi zatezanja armature mreže budu višestruko veći od napona u asfaltu, čime se postiže pouzdano delovanje armature mreže. Prema Tehničkim uputstvima Australijske agencije za transport MRTS104-2025 [17] i Južnoafričke asocijacije za bitumen TG3-2020 [4], armaturna mreža mora obezbediti dovoljnu zateznu čvrstoću pri malim dilatacijama (pri <2% izuženja) kako bi "uhvatila" pukotine u fazi njihovog otvaranja, dok optimalna veličina otvora okaca i kompatibilnost sa zrnima agregata omogućavaju efikasan prenos napona i kontrolu širenja pukotina u inicijalnoj fazi. Stoga su laboratorijska ispitivanja neophodna za ocenu efektivnosti (ispunjenost cilja) i efikasnosti (maksimalni učinak) primene mreže u asfaltno ojačanom sistemu obuhvaraju:

- zatezna (nominalna) čvrstoća (EN ISO 10319) - utiče na efektivnosti armiranja asfaltnog spregnutog sistema
- zatezna čvrstoća pri 2% dilatacije (EN ISO 10319) - predstavlja vrednost zatezne čvrstoće kojom se definiše sigurnost primene armature mreže
- maksimalno izduženje (max dilatacija) (EN ISO 10319) - pokazuje efektivnost i pogodnost za primenu mreže
- pad zatezne čvrstoće nakon testa oštećenja (EN ISO 10722 iz 2020 godine) - omogućava kvantitativnu procenu efikasnosti primene mreže
- dimenzije otvora okaca mreže - određuju efektivnost interakcije rešetke mreže i zrna agregata asfalta
- otpornost na zamor dilatacija ϵ_s (EN 12697-24) - omogućava kvantitativnu procenu efektivnosti i efikasnosti mreže na laboratorijskim uzorcima u kontroli trajnih deformacija
- temperaturna otpornost (EN ISO 3146) - ukazuje na efektivnost i pogodnost mreže i zaštitnog premaza za primenu

4.1 Izbor armature mreže i efikasnost spregnutog sistema asfalt + mreža

Poznavanje svojstava armature mreže važno je za odabir mreže pri izradi ojačanja asfaltnih kolovoznih zastora, jer ova svojstva određuju mogućnost ili ograničenja njene primene, uz naravno prethodno definisanje mreže kao optimalnog rešenja. Zato je značajno izdvojiti karakteristike armature mreže koje utiču na efektivnost i efikasnost spregnutog sistema (asfalt + mreža), pri čemu se najveći učinak postiže kada sastavni delovi sistema sadejstvuju u prijemu i raspodeli opterećenja, odnosno kada dolazi do usklađenog prenosa naprezanja i deformacija između asfaltnog sloja i mreže. Imajući to u vidu, izbor armature mreže, uzimajući u obzir sve relevantne karakteristike, treba da bude usmeren ka ostvarivanju osnovnog principa armiranja, koji podrazumeva efikasnu distribuciju deformacija radi optimalne apsorpcije napona zatezanja. Uzimajući u obzir navedeno, kao i preporuke Australijske agencije za transport MRTS104-2025 [17] i Južnoafričke asocijacije za bitumen TG3-2020 [4], izdvojene su karakteristike armature mreže koje imaju izrazito veliki i veliki značaj za učinak armiranja asfaltnog sloja.

Treba naglasiti da netkani geotekstil nema primarnu ulogu armiranja, već svojim karakteristikama posredno utiče na slepljenost slojeva. Indeks apsorpcije bitumenske emulzije netkanog geotekstila u kompozitnom sistemu (mreža+geotekstil) zavisi od težine geotekstila, stanja podloge i vrste emulzije [20]. Zbog toga optimalna količina bitumenske emulzije direktno utiče na smičuću čvrstoću na kontaktu armaturna mreža/asfaltna podloga, smanjujući rizik od klizanja između slojeva, što treba verifikovati Leutnerovim postupkom prema standardu EN 12697-48. U vezi sa iznetim, tabela prikazuje karakteristike i parametre mreže koji su ključni za postizanje maksimalnog učinka armiranja asfaltnih slojeva.

Tabela 1: Značaj karakteristika armaturne mreže

Karakteristika koja armaturna mreže treba da zadovolji u asfaltnom sloju	Parametar	Peporučene vrednosti	Značaj za učinak armiranja
Žilavost	Zatezna čvrstoća pri 2% dilatacije	> 70% nominalne zatezne čvrstoće	karakteristika je od izrazito velikog značaja
	maksimalno izduženje (dilatacija)	≤ 4%	
Puzanje	Pad zatezne čvrstoće nakon testa oštećenja	≤ 20%	
Temperaturna otpornost	Stabilnost zaštitnog sloja mreže pri visokim temperaturama	> 200°C	
Povezanost slojeva (Interlayer Bonding)	Napon slepljivanja Lojtnerovim postupkom	> 0.85 MPa	
Čvrstoća	Zatezna čvrstoća (nominalna)	> 50 kN/m	karakteristika je od velikog značaja
Otpornost na zamor	Epsilon 6	navesti vrednosti Epsilona 6 na armiranim i nearmiranim uzorcima	
Geometrijska svojstva	Dimenzije otvora okaca mreže	5 do 7 puta veći od D ₅₀ zrna asfaltne mešavine	
Netkani geotekstil	Težina	< 40 gr/m ²	uticaj karakteristike nije zanemarljiv

5. ZAKLJUČAK

Efektivnost i efikasnost armaturne mreže u ojačanju asfaltnih kolovoznih konstrukcija direktno zavise od njenih mehaničkih, geometrijskih i funkcionalnih svojstava, kao i od kvaliteta interakcije sa asfaltnim slojem. Ključni uslov za uspešno armiranje jeste usklađeno sadejstvo mreže i asfalta u prijemu, raspodeli i prenosu naprezanja i deformacija, čime se obezbeđuje optimalna apsorpcija zateznih napona i usporava razvoj pukotina. Posebno je značajno da mreža već u fazi inicijacije i razvoja pukotina preuzima naprezanja pri minimalnim deformacijama (pri <2% dilatacije), koje se još ne uočavaju u asfaltu, čime doprinosi povećanju stabilnosti sloja. Efektivnost mreže ogleda se u njenoj sposobnosti da ostvari osnovni cilj armiranja - kontrolu i usporavanje razvoja pukotina, uz produženje životnog veka kolovozne konstrukcije. Efikasnost se, s druge strane, odnosi na stepen u kome mreža maksimalno koristi svoja mehanička svojstva u realnim uslovima opterećenja, pri čemu optimalan izbor karakteristika omogućava postizanje najvećeg učinka uz tehnički i ekonomski opravdanu primenu. Zaključno, izbor armaturne mreže treba da bude zasnovan na sveobuhvatnoj analizi relevantnih parametara, uz laboratorijsku verifikaciju i usklađenost sa važećim tehničkim smernicama, kako bi se obezbedilo pouzdano i tehničko-ekonomski opravdano rešenje ojačanja asfaltnih slojeva.

Literatura

- [1] Moyda, A. Geosynthetic reinforcement in flexible pavement rehabilitation. *Journal of Transportation Engineering*, 2015.
- [2] Tremi, L. Use of geosynthetic materials for asphalt overlay performance improvement. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017.
- [3] ISO/TC 221. Geosynthetics – Technical Committee ISO/TC 221. International Organization for Standardization, 2023/2024.
- [4] TG3 Committee. Technical Guideline: The Use of Geosynthetics in Pavements – Part C: Design with Geosynthetics. South African Bitumen Association (SABITA), 2020.
- [5] Anderson, M., D'Angelo, J., & Huber, G. Forensic Investigation of Early Cracking on I-25 in Denver, Colorado. *Proceedings / Technical Publication in Transportation Engineering*, 2001.
- [6] Rebelo, F. J. P., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Oliveira e Sá, J., Marecos, V., & Afonso, J. Installation and Use of a Pavement Monitoring System Based on Fibre Bragg Grating Optical Sensors. *Sensors*, 2023.
- [7] Fan, Z. Multiscale Study of the Bitumen–Aggregate Interfacial Behavior Based on Molecular Dynamics Simulation and Micromechanics (Doktorska disertacija, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Bauingenieurwesen), 2021.
- [8] Bajić, D. R. Mašinski materijali (II dio). Podgorica: Mašinski fakultet, Univerzitet Crne Gore, 2024.
- [9] Saint-Gobain ADFORS. ADFORS GlasGrid – Pavement Reinforcement System, 2025.
- [10] ISO/DTR 18228-10. Design Using Geosynthetics – Part 10: Asphalt Pavements. Technical Report, ISO/TC 221, 2023/2024.
- [11] Maggiore, C. A Comparison of Different Test and Analysis Methods for Asphalt Fatigue (PhD Thesis). University of Nottingham, 2014.
- [12] Orešković, M., Trifunović, S., Mladenović, G., & Bohuš, Š. Fatigue Resistance of a Grid-Reinforced Asphalt Concrete Using Four-Point Bending Beam Test. In A. F. Nikolaidis & E. Manthos (Eds.), 2019.
- [13] Orešković, M., Bohuš, Š., Virgili, A., & Canestrari, F. Simplified Methodology for Fatigue Analysis of Reinforced Asphalt Systems. *Materials and Structures*, 2024.
- [14] EN ISO 10722. Geosynthetics – Index Test Procedure for the Evaluation of Mechanical Damage under Repeated Loading: Damage Caused by Granular Material (Laboratory Test), 2020.
- [15] Almeida, F., Carlos, D. M., Carneiro, J. R., & Lopes, M. de L. Resistance of geosynthetics against the isolated and combined effect of mechanical damage under repeated loading and abrasion. *Construct-Geo*, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal. 2019.
- [16] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) & SETRA. French Design Method for Pavement Structures / Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves. Paris, 1998.
- [17] Stojnić, D., & Bohuš, Š. Postupak dimenzionisanja kolovozne konstrukcije primenom termostabilne mreže od staklenih vlakana za ojačanje (armiranje) asfalta. Stručni seminar o cestovnoj infrastrukturi i sigurnosti u prometu CESTE, Rovinj, 2022.
- [18] Transport and Main Roads. MRTS104: Asphalt Geosynthetics for Delaying Pavement Reflective Cracking. Transport and Main Roads Specifications, Australia, 2025.
- [19] Sudarsanan, N., Arulrajah, A., Karpurapu, R., & Amrithalingam, V. Fatigue Performance of Geosynthetic-Reinforced Asphalt Concrete Beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020.
- [20] Correia, N. S., Silva, M. P. S., & Shahkolahi, A. Optimum tack coat rate for different asphalt geosynthetic interlayers to achieve optimum shear bond strength. *Geotextiles and Geomembranes*, 2024.