

Primljen / Received: 3.2.2023.

Ispravljen / Corrected: 25.5.2023.

Prihvaćen / Accepted: 16.6.2023.

Dostupno online / Available online: 10.10.2023.

Novi pristupi i materijali za sanaciju pukotina u asfaltu

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Abdulgazi Gedik**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Malatya Turgut Ozal, Malatya, Turska
Tehnički i prirodoslovni fakultet
Odjel za građevinarstvo
abdulgazi.gedik@ozal.edu.tr
Autor za korespondenciju



Mr.sc. **Ozgur Ozcan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sırnak, Sırnak, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
ozgurozcan@sirnak.edu.tr



Doc.dr.sc. **Sedat Ozcanan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sırnak, Sırnak, Turska
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
sozcanan@sirnak.edu.tr

Pregledni rad

Abdulgazi Gedik, Ozgur Ozcan, Sedat Ozcanan

Novi pristupi i materijali za sanaciju pukotina u asfaltu

Rana pojava pukotina na asfaltnom kolniku može oštetiti njegovu kvalitetu, značajno smanjiti nosivost, udobnost i sigurnost vožnje, pa čak dovesti i do potpunog kolapsa prometnice. Rad pruža detaljan pregled najnovijih pristupa i materijala za sanaciju pukotina u asfaltu, njihove prednosti i ograničenja, mogućnosti poboljšanja kvalitete asfaltnih površina te neke buduće perspektive. S tim u vezi, ovim radom autori žele pridonijeti u istraživanju i otkrivanju inovativnih tehničkih rješenja i ekonomičnih materijala za pravodobnu sanaciju ranih pukotina na asfaltnoj površini. Preporučuju se daljnja istraživanja kako bi se unaprijedili napori u otkrivanju učinkovitijih, praktičnijih, ekonomičnijih, održivih i ekološki prihvatljivih metoda i sredstava za sanaciju pukotina u asfaltu.

Ključne riječi:

samozacjeljivanje, asfaltna površina, pukotine na asfaltu, obnavljanje, zagrijavanje

Research paper - Subject review

Abdulgazi Gedik, Ozgur Ozcan, Sedat Ozcanan

Novel approaches and materials for healing asphalt cracks

Premature cracks in an asphalt pavement may damage its intact structure, substantially decrease its load-bearing capacity, degrade its driving comfort and safety, and even lead to total pavement failure. This paper provides a detailed state-of-the-art review regarding the impact of new approaches and materials on the curing of asphalt cracking, along with an explanation of their advantages, deficiencies, improvement opportunities, and future perspectives. By providing this background information, this study intends to contribute to the discovery of ground-breaking technical solutions and cost-effective materials to remedy premature asphalt pavement cracks at the right place and time. Future studies are recommended to advance efforts to discover more effective, practical, cost-saving, sustainable, and eco-friendly methods and agents for healing asphalt cracks.

Key words:

self-healing, asphalt pavement, asphalt cracks, rejuvenator, heating

1. Uvod

S eksponencijalnim rastom putničkog i teretnog prometa na autocestama, vlade i prometne agencije su suočene s povećanim zahtjevima sigurnosti i udobnosti vožnje [1]. Stoga je potrebno prevladati izazov održavanja oštećenih površina ceste dok se svijet suočava s ograničenim prirodnim resursima i financijskim poteškoćama [2, 3]. U normalnim okolnostima, prve rekonstrukcije cestovnih površina potrebne su u prvih 8 do 12 godina njihovog uporabnog vijeka [4]. Nakon tog početnog perioda korištenja cesta, tipični problemi koji se javljaju na cestovnim površinama odnose se na kolotrage, odvajanje slojeva i pucanje, a to se događa zbog ugradnje materijala niske kvalitete, loših asfaltnih mješavina, nepravilnog postupka asfaltiranja, nedovoljne debljine kolnika, opterećenja teškim vozilima, oštećenja uzrokovanih vlagom i klimatskim uvjetima [5]. Iako je kontinuirano nakupljanje oštećenja pod utjecajem ponavljajućih prometnih opterećenja glavni razlog širenja pukotina, Roque i suradnici (2015.) navode to da većina prosječnih opterećenja kotača ne pridonosi značajno stvaranju pukotina, pogotovo tijekom rane faze uporabnog vijeka asfaltnih cesta [6]. Umjesto toga, promjene svojstava bitumenske mješavine tijekom uporabnog vijeka kolnika, koje čine asfaltni sloj tvrdim, krhkijim i manje sposobnim za samozacjeljivanje, mogu biti jedan od glavnih čimbenika formiranja početnih pukotina. Osim toga, određeni oblici pucanja asfalta pojavljuju se čak i na kvalitetno asfaltiranim cestama bez prometa jer su izloženi nepovoljnim vremenskim uvjetima. Stoga su detaljno istraženi osnovni čimbenici koji uzrokuju nastanak i širenje pukotina, kao i detaljna analiza klasifikacije pukotina, a koji su bitni za određivanje tehnika i sredstva koje će se koristiti za obnavljanje tih površina kako bi se spriječio kolaps na cestama. Međutim, taj fenomen i pojava pukotina u ranom uporabnom vijeku cesta dugo vremena su bili podcijenjeni i nije im pridavana velika pažnja. Od ranih 1990-ih godina, značajan porast prometnog opterećenja, prometnog volumena i tlaka guma rezultirao je porastom ranih oštećenja i pukotina, kao i dodatnim problemima na asfaltnim površinama. Upravo je taj problem potaknuo stručnjake za održavanje cesta na stvaranje koncepta "preventivnog održavanja kolnika" [7]. Brza i planska preventivna održavanja kolnika definirana su kao strateški program s ciljem otkrivanja manjih oštećenja i pukotina, tretiranja oštećenja, smanjenja troškova redovitog održavanja i operativnih aktivnosti te usporavanja progresivnog propadanja cestovnih površina [8, 9]. Primjeri preventivnih tretmana odnose se na zatvaranje pukotina, nanošenje zaštitnih premaza, mikrooblaganje, tanke i/ili ultratanke bitumenske obloge, recikliranje površine (vruće i hladne mješavine) te ugradnju drenažnih sustava [10]. Važno je napomenuti da je ključno pravodobno odabrati i primijeniti odgovarajući tretman za dijagnosticirano oštećenje.

Ovaj rad pruža kratak pregled uobičajenih pukotina na asfaltu, opisuje uzroke pucanja i inovativnih tehnika održavanja cestovnih površina. Također, raspravlja se o inovativnim materijalima i konceptima koji se koriste diljem svijeta za rekonstrukcije kolnika.

2. Uobičajene vrste pukotina

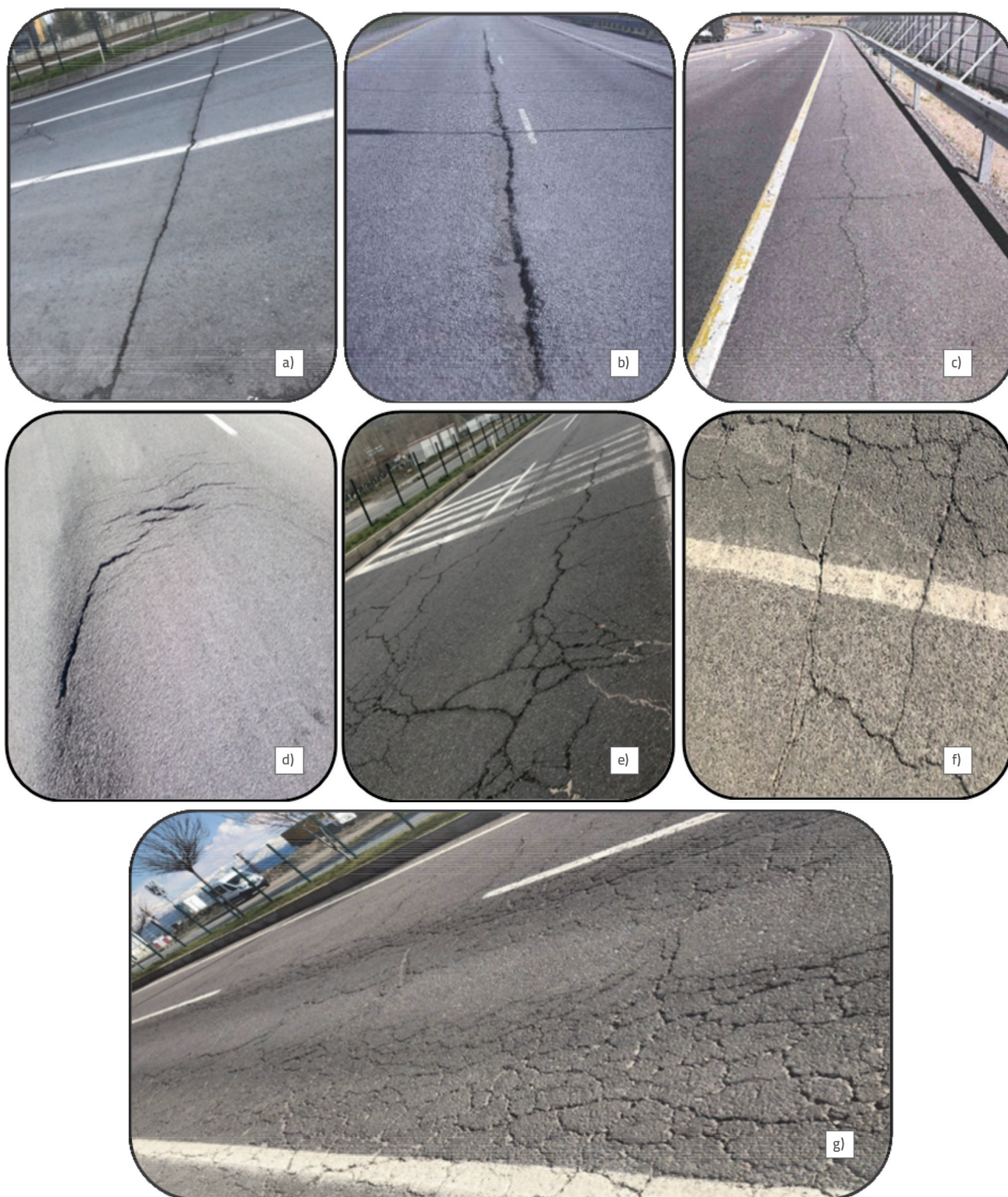
Najčešće vrste pukotina na asfaltnim kolnicima su poprečne, uzdužne, rubne, klizne, strukturne, blokovske pukotine i pukotine uslijed zamora materijala. Poprečne pukotine mogu nastati zbog temperaturnih fluktuacija u slojevima fleksibilnih kolnika. Konkretno, kada su naprezanja izazvana temperaturom većom od čvrstoće asfaltnog materijala, termičko skupljanje uzrokuje poprečno pucanje. Nadalje, asfaltni slojevi koji se sastoje od tvrdih veziva visoke konzistencije postaju krhki i osjetljivi na poprečno pucanje pri niskim temperaturama. Iako takva vrsta pucanja nije izravno povezana s elastičnim modulom, vlačnom čvrstoćom, debljinom temeljnog sloja i opterećenjem osovine vozila/tlaka guma, intenzivna prometna opterećenja mogu utjecati na širenje postojećih pukotina [11]. Kao što se može vidjeti na slici 1.a, poprečne pukotine su okomite na srednju crtu kolnika, a razina ozbiljnosti određena je na temelju širine pukotine. Razina ozbiljnosti bilo koje poprečne pukotine s prosječnom širinom manjom ili jednakom 6 mm smatra se "niskom", kod pukotina širine veće od 6 mm, ali manje od 19 mm smatra se "umjerenom", a kod pukotina čija je širina veća od 19 mm smatra se "visokom" razinom ozbiljnosti [12]. Općenito, sanacija pukotina koje su niskog i umjerenog stupnja ozbiljnosti može se izvršiti brtvljenjem, a kod pojave pukotina visoke razine ozbiljnosti postojeći asfaltni sloj obično se uklanja i zamjenjuje novim slojem.

Kao što je prikazano na slici 1.b, uzdužne pukotine općenito se pojavljuju paralelno sa središnjom crtom (os) kolnika. Općenito se smatraju pretečama pucanja uslijed zamora i/ili loma konstrukcije, a razlog su infiltracije površinske vode i pogoršanja hrapavosti kolnika. Najistaknutiji čimbenici koji pridonose ovoj vrsti pukotina su loša konstrukcija ili lokacija uzdužnih radnih spojeva, pukotine koje se odbijaju od donjih slojeva, pucanje odozgo prema dolje, segregacija koja proizlazi iz neispravnih/pogrešnih operacija asfaltiranja, širenje glinene podloge i različito slijeganje između dijelova nasipa [13]. Udio zračnih šupljina i raspodjela veličine čestica također utječu na propusnost i otpornost na pukotine [14]. Razina ozbiljnosti i pristupi održavanju za uzdužne pukotine bili su identični onima za poprečne pukotine. Roberts i sur. (1996.) navode da nakon brtvljenja za daljnje sprječavanje prodiranja vode i klizanja, kolnici sa saniranim niskim i srednje teškim uzdužnim pukotinama mogu se normalno koristiti duže vrijeme i podnijeti prometno opterećenje [15].

Rubne pukotine se šire u smjeru kolnika; međutim, uglavnom se pojavljuju unutar rubnih i zaustavnih traka kolnika, kao što je prikazano na slici 1.c. To se pripisuje neadekvatnom bočnom podupiranju rubova, nedovoljnoj zbijenosti rubnog dijela ceste, prekomjernoj konsolidaciji materijala od kojeg je izgrađen temeljni nasip, lošoj drenaži, sušenju tla i bujnom raslinju uz vanjski rub kolnika. Fwa (2006.) navodi da se pukotine bez loma ili gubitka materijala tumače kao "nisko teške" [12]. Pukotine s ograničenim lomljenjem i gubitkom materijala do 10 % smatraju se "umjerenom teškim", a one s očitim lomljenjem i gubitkom

materijala većim od 10 % smatraju se "vrlo teškim". Na temelju razine ozbiljnosti i proširenosti rubnih pukotina, rješenje je ispuniti pukotine visoko polimeriziranom bitumenskom masom,

ukloniti obližnju vegetaciju, poboljšati odvodnju i, kao zadnje rješenje, rekonstruirati cijelu dionicu na kojoj su se pojavile pukotine.



Slika 1. Pukotine u asfaltu: a) poprečne pukotine; b) uzdužne pukotine; c) rubne pukotine; d) pukotina uslijed klizanja; e) pukotina uslijed refleksije; f) pukotina u bloku; g) pukotina uslijed zamora

Na slici 1.d može se vidjeti kako se pukotine uslijed klizanja formiraju u obliku polumjeseca i uglavnom se pojavljuju na dionicama ceste gdje ne postoji učinkovita veza između slojeva asfalta koji se nalaze jedan iznad drugoga. Neodgovarajuće veze prije svega su povezane s neprimjerenom nanosenim slojevima bitumenske emulzije za sljepljivanje, asfaltnim agregatima s visokim udjelom pijeska, prisutnošću prašine, tragovima tla od gline, ulja, priljavnosti, pa čak i površinske vode na cesti koja se asfaltira. S obzirom na horizontalna naprezanja izazvana velikim prometnim opterećenjem, posebnu pozornost treba obratiti na dijelove kolnika s naglim kočenjem, kao što su raskrižja, pješački prijelazi, nizbrdice i uzbrdice [4].

Refleksijske pukotine prikazane na slici 1.e izazvane su horizontalnim i vertikalnim pomacima donjih dijelova starog asfaltnog sloja s diskontinuitetom. Koncentracije naprezanja ili deformacija zbog prometnih opterećenja, kao i skupljanje, skupljanje, širenje i bubrenje zbog teških uvjeta okoline, glavni su mehanizmi zbog kojih se događaju ti pomaci. Takvu vrstu pukotine također može uzrokovati oštećenje koje se širi od temelja ili podloge ceste i proteže se do gornjeg površinskog sloja ceste. Ceste s linearnim i ograničenim reflektirajućim pukotinama mogu se sanirati brtvljenjem pukotina, a one s nelinearnim i velikim pukotinama tako da se nanese novi asfaltni sloj. Obećavajuće rezultate u Poljskoj [16] pružila je primjena drugih tehnika, kao što su geotekstilni impregnirani vezivom, čelične mreže, slojevi od hladnog asfaltbetona i membranski međuslojevi koji apsorbiraju naprezanja. Pokazalo se to da primjena specifičnih modifikatora, posebice vlakna od guma, povećavaju otpornost kolnika na reflektirajuće pukotine i oštećenja nastala zbog vode [12, 17].

Blokovske pukotine su križne pukotine koje cijepaju površinu kolnika u pravokutne ili kvadratne blokove, kao što je prikazano na slici 1.f [18]. Veličina uobičajene blokovske pukotine općenito može biti od 0,1 do 10 kvadratnih metara. Iako postoje različiti mehanizmi koji dovode do razvoja blokovskih pukotina, ključni čimbenici su razina vlage, fluktuacije temperature, širenje prethodnih pukotina (refleksijske pukotine) i krtost bitumenskog veziva. Osim toga, važan je čimbenik i nedostatak dovoljne količine vlage u agregatu tijekom prve primjene ili tijekom uporabnog vijeka kolnika. Poznato je da ekstremni toplinski uvjeti znatno utječu na širenje i skupljanje bitumena, a niske temperature i smrzavanje mogu rezultirati značajnim skupljanjem krupnih i sitnih agregata. Treba napomenuti da ta vrsta pukotina nije prije svega povezana s prometom; međutim, takvi ponavljajući nepovoljni uvjeti mogu uzrokovati njihovo širenje. Male blokovske pukotine obično se saniraju vrućim materijalom za punjenje pukotina, a velike pukotine tankim novim asfaltnim slojem.

Svojstvo bitumenskih materijala uslijed zamora smatra se glavnim faktorom asfaltne mješavine u projektiranju prometnica jer ima izravnu ulogu u ponašanju pri pucanju asfaltiranih cesta u prosječnom vijeku trajanja [19, 20]. Pukotine uslijed zamora uzrokovane su ponavljajućim opterećenjem gumama koje dovode do skupa međusobno povezanih, isprepletenih i

uzdužnih pukotina [12, 21]. Najprije nastaju na dnu bitumenskog sloja, gdje se javljaju najveća vlačna naprezanja, a zatim se šire prema gore [22]. Kada se pukotine nastale uslijed zamora pojave na asfaltnoj površini, izgledom postaju vrlo slične koži krokodila, kao što je prikazano na slici 1.g, stoga se nazivaju i "krokodilskim pukotinama". Ta vrsta pukotina nastaje zbog svojstava asfaltnih materijala, prevelikim opterećenjem teškim vozilima, slabljenjem podloge ili nepovezanih slojeva, nepravilnim projektiranjem asfaltne mješavine i neodgovarajućom debljinom kolnika [4]. Cheng i sur. (2002.) navode da su pukotine nastale uslijed zamora vidljive unutar bitumenskog veziva i morta ili na dodirnoj površini veziva i agregata [23]. Međutim, u sprječavanju nastanka pukotina uslijed zamora, dokazano je to da je uloga bitumena, a time i morta u mješavini značajnija od uloge agregata. Stoga, ojačavanje bitumenskog veziva s modifikirajućim sredstvom, sredstvom protiv odvajanja predstavlja učinkovit pristup na razini projektiranja asfaltne mješavine kako bi se spriječilo pucanje asfalta uslijed zamora zbog ponavljajućeg prometnog opterećenja [24]. Kolnici s tankim slojevima i lošim nosivim slojevima, zbog svojih velikih sustava drenaže, također su vrlo osjetljivi na pojavu pukotina uslijed zamora. Pukotine uslijed zamora s širinama manjim od 3 mm na početku mogu se popraviti nanošenjem *slurry* premaza ili premaza na površini slija asfalta. U slučaju lokalnih pukotina uslijed zamora, svaki asfaltni i vezani sloj podloge do 60 cm dubine treba ukloniti i sanirati s pravilnom instalacijom drenaže (tehnika popravka do punog sloja). Novi asfaltni sloj koji je konstrukcijski dovoljno otporan na prometno opterećenje treba postaviti preko cijele površine kolnika na kojem su se pojavile pukotine uslijed zamora [4].

3. Novi materijali i primjene u Turskoj

U Turskoj su dostupni karakteristični asfaltni materijali za sanaciju pukotina različitih svojstava, a dijele se na hladno miješane i vruće miješane termoplastične materijale. Derivati emulzije (bitumenska emulzija i bitumenska emulzija modificirana polimerom (skraćeno PMB emulzija)) hladno su miješani termoplastični materijali koji se koriste za popunjavanje pukotina. Tijekom njihovog nanošenja u pukotinama bez toplinske obrade, samotaloženje bitumenske emulzije je poželjno. Zbog male fleksibilnosti i visoke osjetljivosti na toplinu, pogodna je za sanaciju od bitumena, PMB emulzije, vlakana i gume. Najprikladniji je materijal za popunjavanje aktivnih pukotina jer osigurava asfaltu minimalnu fleksibilnost i otpornost na niske temperature. Kombinirana primjena polimera i gume osigurava fleksibilnost bitumena i povećava njegovu učinkovitost sanacije pukotina. Stupanj fleksibilnosti ovisi uglavnom o količini bitumena, postotku gume u bitumenu, načinu na koji je guma ugrađena u bitumen (pomiješana ili otopljena) i postotku polimera. Dodavanje polimernih aditiva toplo miješanim termoplastičnim punilima za pukotine poboljšava svojstva bitumena i njegovu učinkovitost. U kombinaciji s brzom pripremom, brzim i lakim izvođenjem (dobra

obradivost) i kratkim vremenom stvrdnjavanja, pokazalo se da takva mješavina na cestama u Turskoj poboljšava prijanjanje, kompatibilnost s postojećim slojem premaza, fleksibilnost, omekšavanje, tečnost i otpornost na starenje nepovoljne vremenske uvjete i abraziju [25].

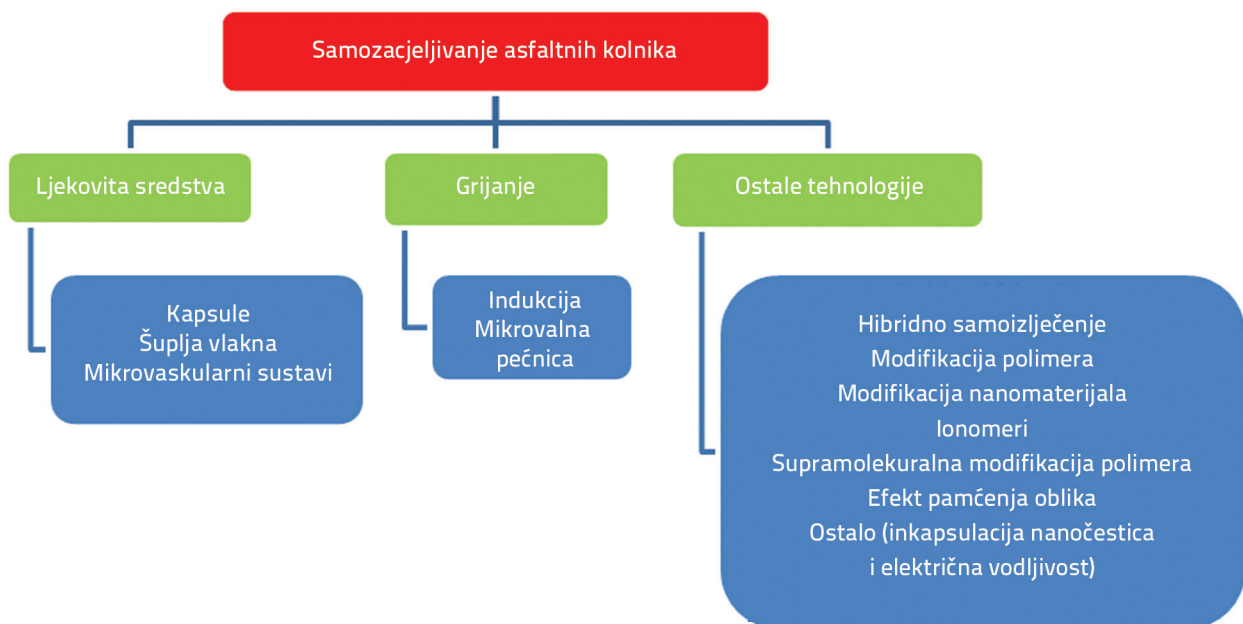
U Turskoj se sanacija pukotina sastoji od nekoliko koraka, a to su: rezanje pukotina i njihovo čišćenje, priprema materijala, ugradnja materijala i sušenje. Pukotine se režu da bi se stvorila središnja, jednolika, pravokutna komora iznad pukotine, uz minimalno oštećenje okolnog premaza. Pukotine se režu pomoću dijamantne pile ili rotacijskog udarnog čekića. To omogućava sredstvu za brtvljenje prodor u dubinu pukotina. Zvezdolikim čeličnim zupcima tvore komoru unutar pukotina. Jedan od glavnih razloga loših sanacija pukotina je neadekvatno prijanjanje punila na stijenu pukotine. Zato se, nakon rezanja pukotina, prašina koja nastane brušenjem uklanja pomoću toplog ili hladnog stlačenog zraka. Čišćenje pukotina provodi se uz pomoć ručnih alata, a to se odnosi na četkanje, metenje, ispuhivanje hladnim ili toplim zrakom ili pijeskom. Ispuhivanje stlačenim zrakom je učinkovita metoda za uklanjanje čestica i prašine te iznimno učinkovita u čišćenju i sušenju pukotina. Pjeskarenje se izvodi u suhim vremenskim uvjetima, nakon čega slijedi ispuhivanje zrakom da bi se uklonio pijesak iz pukotine. Pjeskarenje je specijalizirani postupak koji zahtijeva skupu opremu i materijale. Za učinkovitu primjenu, treba osigurati informacije o parametrima kao što su temperatura zagrijavanja materijala, temperatura postavljanja, pravila dugotrajnog zagrijavanja, temperatura premaza i uvjeti vlage. Pretjerano zagrijavanje može znatno promijeniti svojstva materijala, a sanacija pukotina pri niskim temperaturama može uzrokovati probleme kao što su nepravilna obradivost i prijanjanje. U Turskoj se materijal za popunjavanje pukotina nanosi u relativno

povoljnim vremenskim uvjetima (proljeće ili jesen), jer je teže održavati temperaturu materijala tijekom hladnog i vrućeg vremena. Metode postavljanja materijala u Turskoj variraju od jednostavnog punjenja nepripremljenih pukotina do izrade komore određene veličine u pukotinama i njihovo zapunjavanje. Okna na cesti su često povezana s postupcima brtvljenja, a za postupke punjenja često se primjenjuje jednostavno lijepljenje, iako to nije uvijek slučaj. Nakon što započnu postupci punjenja i brtvljenja, važno je da svi procesi napreduju stabilnim tempom. Sušenje štiti materijale za sanaciju pukotina od deformacija uslijed prometnog opterećenja. Materijali za sušenje se uglavnom koriste na dijelovima ceste gdje promet prolazi po materijalu za sanaciju pukotina prije nego što se završi proces njegovog stvrdnjavanja. U Turskoj se za sušenje obično koriste vapno i pijesak [25].

4. Inovativne metode i sredstva za sanaciju pukotina u asfaltu

Samozacjeljivanje pukotina, što se smatra novim postignućem, sprječava širenje pukotina u asfaltu, ali i produžuje vijek trajanja kolnika, a to smanjuje potrebu za održavanjem i sanacijama. Postoje tri glavne metode za samozacjeljivanje asfaltnih površina: saniranje posebnim sredstvima, grijanje i druge metode, koje su prikazane na slici 2. U ovom istraživanju detaljno su razmotrene učinkovitost i svojstva prvih dviju navedenih metoda.

Sredstva za samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima ugrađena su u kolnike u obliku mikrokapsula te šupljikavih i mikrovaskularnih vlakana. Ona su kapsulirana, tj. prekrivena odgovarajućom opnom ili premazom. Služe za sanaciju pukotina kroz kapsule i vlakna (šuplja ili vaskularna). Kao samostalna



Slika 2. Metode za samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima

Tablica 1. Svojstva aditiva za samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima

Sredstva	Obnavljajuće sredstvo	Enkapsulacija	Primjena (**% prema masi - **vremenu)	Uspješnost samozacjeljenja/sanacija	Literatura
Kapsule	Suncokretovo ulje	CAC	0,5 % - 48 h	Energija loma: 180,2 %	[26]
	Dimetilfenol i SBS	UFR	10 % - 24 h	Otpornost na udar: 95 %	[27]
	Aromatsko ulje i polarna epoksidna smola	UFR	0,3–0,5 % - 4 h	Duktilnost: 90,37 %	[28]
	R20	CAC	2 % - 4 h	Čvrstoća na savijanje: 90,1 %	[29]
	Lagana ulja	MUF	5 % - 48 h	Vlačna čvrstoća: 83,8 %	[30]
	Otpadno ulje	UFR	4 % - 2 h	Kompleksni modul: > 80 %	[31]
	Suncokretovo ulje	CAC	0,5 % - 48 h	Otpornost na zamor: 49,2 %	[32]
	Epoksidna smola	UFR	3 % - 3 h	Duktilnost: 40 %	[33]
	ZS-1	UFR	3 % - 4 h	Duktilnost: 36,6 %	[34]
Šupljikava vlakna	R20	CAC	8 % - 20 h	Vršno opterećenje u SCB: 19,3 %	[35]
	Biogorivo	Šupljikav CAF	5 % - 144 h	Čvrstoća na savijanje: 100 %	[36]
	21 % zasićenih i 67 % aromatičnih tvari	Šupljikav CAF	5 % - 24 h	Duktilnost: 82,5 %	[37]
Mikrovaskularna vlakna	Sredstvo za obnavljanje	Razdijeljeni CAF	1,3 % - 3 h	Čvrstoća na savijanje: 10 %	[38]
	Sredstvo za obnavljanje na bazi ulja	PVDF šupljikava vlakna	1 No. of fiber - 24 h	Vlačna čvrstoća: 78 %	[39-41]

**% po masi: količina primjene (izražena kao postotak mase ili volumena veziva ili smjese) i **vrijeme: razdoblje njegovanja.*
SBS: Stiren - butadien - stiren, CAC: kalcijeve alginatne kapsule, UFR: urea formaldehidna smola, MUF: melaminska urea formaldehidna smola, CAF: kalcijeva alginatna vlakna, PVDF: poliviniliden fluorid i SCB: Polukružno savijanje.

metoda zacjeljivanja asfaltnih kolnika, enkapsulacija se odnosi na primjenu mikrokapsula ispunjenih agensom za samozacjeljenje koji može popraviti pukotine. Mikrokapsule su obično napravljene od sredstva koje je otporno na naprezanje kolnika i ispunjene su tekućim sredstvom za samozacjeljenje, kao što je polimer, epoksid ili bitumen. Kada asfalt ima oštećenje poput pucanja ili trošenja površine, mikrokapsule pucaju i oslobađaju sredstvo za samozacjeljenje u oštećena područja. Sredstvo ispunjava pukotine ili praznine, zatvara deformirano područje i obnavlja kolnik. Postupak samozacjeljenja znatno produžuje uporabni vijek kolnika. Enkapsulacija je obećavajuća tehnika samoregeneracije asfalta jer se može lako ugraditi u fleksibilne kolnike tijekom izgradnje i može pomoći u sprječavanju pojave daljnjih deformacija. Osim toga, enkapsulacija smanjuje potrebu za skupim popravcima i održavanjem, te poboljšava ukupnu izdržljivost i otpornost kolnika. Neka istaknuta istraživanja koja navode utjecaj sredstava za samozacjeljenje na reologiju i mikrostrukturu asfaltnih kolnika prikazana su u tablici 1. U toj tablici navedeni su sredstva i vrste enkapsulacije za samozacjeljenje, količine (izražene kao postotak veziva ili mase/volumena mješavine), vrijeme (razdoblje mirovanja) i postotak učinkovitosti samozacjeljenja/samoobnove.

Kao što je prikazano u tablici 1., agensi za samozacjeljivanje su podijeljeni u tri skupine: kapsule, šuplja vlakna i mikrovaskularna vlakna. Među kapsulama, najvišu učinkovitost samozacjeljenja

imale su kapsule od kalcijevog alginata (CAC), zatim slijede UFR i MUF. Iako se učinkovitost vlakana u samozacjeljivanju razlikuje ovisno o vrsti vlakana, CAF ima najveću ocjenu, a zatim slijedi PVDF. Među tekućim sredstvima za obnovu asfalta, najvišu učinkovitost samozacjeljenja ima sredstvo za obnovu na bazi ulja, zatim polimerna epoksidna smola i biogorivo. Općenito, može se zaključiti da od svih navedenih sredstava, kapsule na bazi spora i sredstva za obnavljanje imaju najveću učinkovitost samozacjeljenja asfalta.

Osnovni kriteriji za izradu kapsula su odabir odgovarajućeg sredstva za samozacjeljivanje i metode enkapsulacije. Sredstvo za samozacjeljivanje treba biti odabrano na temelju njegove sposobnosti da popravi pukotine i deformacije na dotrajalom asfaltu. Najvažnije varijable koje treba uzeti u obzir pri odabiru najboljega sredstva za enkapsulaciju su termalna i mehanička stabilnost kako bi izdržale miješanje i sabijanje, te kapacitet da oslobode sredstvo za samozacjeljivanje kada se pojavi pukotina. Učinkovitost samozacjeljivanja do 38,67 % postignuta je primjenom mikrokapsula od 0,3 % mase veziva u asfaltnoj mješavini. Povećane doze mikrokapsula nepovoljno utječu na duktilnost asfalta, pa stoga idealna postotna varijacija kapsula u mješavini treba bi od 0,3 do 0,5 % [42].

Samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima metodom zagrijavanja provedeno je primjenom metoda indukcije i mikrovalne energije. Zagrijavanje je učinkovita metoda

Tablica 2. Postupak indukcijskog zagrijavanja za samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima

Provodljivi aditivi	Temperatura samozacjeljivanja [°C]	Primjena (* % prema masi-vremenu)	Učinkovitost samozacjeljivanja / sanacije	Literatura
Čelična vuna	112	10 % - 120 s	Čvrstoća na zamor: 100 %	[44]
Čelična vlakna	85	4 % - 164 s	Čvrstoća na savijanje: 83,9 %	[45]
Čelična vuna	85	4 % - 158 s	Čvrstoća na savijanje: 82,5 %	[45]
Čelična vuna	85	4 % - 250 s	Čvrstoća na lom: 78,8 %	[46]
Čelična vlakna - šljaka	90	2 % - 160 s	Vršno opterećenje u SCB: 73,37 %	[47]
Čelična vuna	110	5 % - 600 s	Vršno opterećenje u SCB: 72 %	[48]
Čelična vuna	85	1,27 % - 190 s	Produljenje vijeka trajanja pri zamoru: 64 %	[49]
Aluminijski komadići (krhotine)	110	5 % - 1800 s	Vršno opterećenje u SCB: 62 %	[50]
Čelična vlakna - bazalt	90	6 % - 69 s	Vršno opterećenje u SCB: 59,08 %	[47]
Čelična vlakna	87	6 % - 89 s	Produljenje vijeka trajanja uslijed zamora: 56,17 %	[48]
Ostatci čelika Sting	94	5 % - 240 s	Čvrstoća na lom: 47 %	[51]
Grafitna nanovlakna	105	0,5 % - 1200 s	Čvrstoća na savijanje: 43 %	[52]
Pjeskareni čelik	90	4,4 % - 240 s	Čvrstoća na lom: 42 %	[51]
Karbonska vlakna	104	0,5 % - 1200 s	Čvrstoća na savijanje: 41,2 %	[52]
Čestice lijevanog čelika	55	6 % - 8 s	Zamor pri razvlačenju: 30 %	[53]
Karbonske nanocijevi	108	0,5 % - 1200 s	Čvrstoća pri savijanju: 5,2 %	[52]

samozacjeljenja u fleksibilnim kolnicima jer može brzo popraviti oštećenja uz minimalno ometanje prometa. Također, može se koristiti za popravak malih pukotina i sprječavanje njihovog širenja. Međutim, važno je napomenuti da zagrijavanje nije trajno rješenje i morat će se ponavljati periodično kako bi se održala funkcionalnost kolnika.

Asfalt ima ograničenu sposobnost samozacjeljivanja, koja je usko povezana s temperaturom i vremenom njegovanja. Međutim, nije uvijek moguće zaustaviti promet kako bi se omogućilo razdoblje njegovanja koje bi omogućilo samozacjeljenje pukotina u asfaltnim kolnicima pri temperaturi okoliša. Stoga je predložen koncept samozacjeljenja putem indukcijskog zagrijavanja. Mejjide i suradnici (2016.) su naveli da je indukcijsko zagrijavanje učinkovitije od infracrvenog zagrijavanja za popravljivanje pukotina [43]. Međutim, budući da je asfalt električni izolator, mora postati električki provodljiv kako bi se jačalo indukcijsko zagrijavanje. Stoga su asfaltu dodani provodljivi aditivi i vlakna kako bi se povećala njegova električka provodljivost. Rezultati istraživanja metoda indukcije i mikrovalova prikazani su u tablicama 2. i 3.

Istraživanja s najboljim rezultatima provodljivih aditiva, temperature i vrste primjene navedena su od vrha prema dnu u tablici 2. U njoj se može vidjeti da primjena vlakana od čelične vune i drugih aditiva poput crnog ugljika i grafita može značajno poboljšati učinkovitost samozacjeljivanja asfaltnih kolnika zagrijavanih indukcijom. Ti materijali imaju visoku električnu provodljivost, što omogućuje učinkovito zagrijavanje i aktivaciju sredstva za samozacjeljivanje. Također, u toj se tablici uspoređuje učinkovitost samozacjeljivanja različitih

vrsta provodljivih aditiva/vlakana, poput čelika, aluminija, grafita i karbonskih vlakana. Rezultati pokazuju da provodljivi materijali na bazi čelika imaju najbolja svojstva i mogu poboljšati učinkovitost samozacjeljivanja asfaltnih kolnika zagrijavanih indukcijom. Idealna temperatura za indukcijsko zagrijavanje je oko 85°C.

Tablica 3. uspoređuje učinkovitost samozacjeljivanja asfaltnih kolnika zagrijavanih mikrovalovima. U njima su korišteni različiti provodljivi aditivi, kao što su različite vrste čeličnih proizvoda, prah ferita, leteći pepeo i bakreno-čelične gume. Najviša učinkovitost samozacjeljivanja uočena je kod čeličnih proizvoda, potom u prahu ferita, letećem pepelu i bakreno-čeličnim gumama. Za asfaltne kolnike zagrijavane mikrovalovima primijenjene su različite frekvencije i energije. Općenito se smatra da veće frekvencije i energije obično bolje djeluju u sanaciji pukotina; međutim, istovremeno mogu dovesti do veće potrošnje energije i potencijalnog oštećenja kolnika. Sastav asfaltnih mješavina može utjecati na učinkovitost samozacjeljenja asfaltnih kolnika zagrijavanih mikrovalovima. Zaključeno je to da asfaltne mješavine s većim udjelima mineralnih punila i polimera imaju bolja svojstva samozacjeljenja. Količina vlage u kolniku također može utjecati na njegovu učinkovitost samozacjeljenja. Kolnici s većim udjelom vlage redovito su pokazivali nižu učinkovitost samozacjeljenja.

Zagrijavanje mikrovalovima, za razliku od indukcijskog zagrijavanja, ne zahtijeva dodavanje provodljivih materijala, što se smatra značajnom prednošću. Osim toga, zagrijavanje asfalta mikrovalovima brže je i dosljednije. Učinkovitost samozacjeljivanja asfalta dodatno je povećana vrlo malim

Tablica 3. Svojstva zagrijavanja mikrovalovima za samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima

Provodljivi aditivi	Temperatura za samozacjeljivanje [°C]	Primjena (* % prema masi-vremenu)	Učinkovitost samozacjeljivanja / sanacije	Literatura
Čelična troska (vruće lijevana)	> 90	60 % - 30 s	Opterećenje u SCB: 96,4 %	[54]
Čelična vuna	44	2 % - 40 s	Opterećenje u SCB: 95 %	[55]
Čelična vlakna	80	6 % - 1800 s	Čvrstoća na savijanje: 88 %	[56]
Prah ferita	65,04	20 % - 40 s	Opterećenje u SCB: 83,59 %	[57]
Leteći pepeo	75 - 100	100 % - 80 - 120 s	Opterećenje u SCB: 80 %	[58]
Reciklirana guma od čelika i bakra	70,09	2 % - 20 s	Opterećenje u SCB: 80 %	[59]
Čelična šljaka	50,08	100 % - 40 s	Opterećenje u SCB: 76,82 %	[57]
Mješavina čeličnih vlakana i bakrene šljake	68,57	4 % - 20 s	Opterećenje u SCB: 60 %	[59]
Čelična troska	80	100 % - 1800 s	Čvrstoća na savijanje: 57 %	[56]
Čelična vlakna	71,7	2 % - 40 s	Čvrstoća na savijanje: 53,74 %	[60]
Čelična troska	45,2	20 % - 80 s	Kompleksni modul: 39,99 %	[61]
Prah ferita	55	80 % - 120 s	Produljenje vijeka trajanja pri zamoru: 1,33	[62]

količinama provodljivih materijala kao što je čelična vuna. Može se zaključiti da samozacjeljivanje pukotina u asfaltnim kolnicima mikrovalovima pruža bolje rezultate od indukcijskog zagrijavanja.

Druge tehnologije samozacjeljivanja odnose se na hibridno samozacjeljivanje [63], modifikaciju polimera [64], modifikaciju nanomaterijala [65], ionomere [66], modifikaciju supramolekularnih polimera [67], efekt pamćenja [68] i druge preporučene tehnologije [69, 70]. Hibridno samozacjeljivanje je, kao kombinacija različitih metoda samozacjeljivanja (posebno enkapsulacije i zagrijavanja), učinkovita tehnika u projektiranju kolnika. Modifikacije polimera poboljšavaju trajnost i sposobnost samozacjeljivanja bitumenskih veziva. Čestice polimera u asfaltnim mješavinama mogu popuniti pukotine i spriječiti veća oštećenja. Tehnika modifikacije nanomaterijalom primijenjena je na način da su asfaltnoj mješavini dodani nanomaterijali kako bi se poboljšala njezina mehanička svojstva i sposobnost samozacjeljivanja. Zbog svoje jedinstvene kemijske strukture, ionomeri mogu formirati jake međumolekularne veze koje stvaraju samozacjeljujuće sustave za pukotine u asfaltu. Još jedna takva metoda jest modifikacija supramolekularnim polimerima, koja se odnosi na modifikaciju veziva asfalta supramolekularnim polimerima koji mogu formirati reverzibilne veze. Taj fenomen omogućava asfaltnim kolnicima samozacjeljivanje ponovnim formiranjem tih veza kada su izloženi propadanju. Efekt pamćenja oblika odnosi se na primjenu posebnih vrsta sredstava koji mogu vratiti izvorni oblik dijela oštećenog kolnika nakon pojave deformacije. U asfaltnim kolnicima, tom tehnikom se mogu popraviti određena oštećenja omogućujući kolniku da "zapamti" i vrati svoj početni oblik. Ostale preporučene tehnologije odnose se na mikrobnu inducirano precipitaciju kalcijevog karbonata, primjenu sredstava za obnavljanje i

geosintetičke međuslojeve. Svaka od tih tehnika ima svoje prednosti i ograničenja, a najbolji pristup ovisi o čimbenicima kao što su specifična vrsta kolnika, oblik pukotina i dostupna sredstva za sanaciju kolnika i njegovo održavanje.

5. Zaključak

Ponavljajuće teško prometno opterećenje i nepovoljni klimatski uvjeti glavni su čimbenici koji utječu na stvaranje pukotina na asfaltnim kolnicima. Ako se pukotine odmah ne saniraju, započinje njihovo širenje koje može dovesti do potpunog propadanja kolničke površine. Stoga upravitelji moraju osigurati financijska sredstva za održavanje i sanacije kolnika kako bi se osigurala njihova uporabljivost. Pravodobno održavanje iznimno je važno za produljenje uporabnog vijeka kolnika. Na temelju rezultata provedenog istraživanja zaključeno je sljedeće:

- Najčešće vrste pukotina u asfaltnim kolnicima su poprečne, uzdužne, rubne, klizne, refleksne, blokovske i pukotine uslijed zamora. Pukotine koje nastaju uslijed zamora materijala predstavljaju ozbiljna oštećenja i izazovnu temu za prometne inženjere i cestovne organizacije diljem svijeta.
- Za saniranje pasivnih pukotina, u Turskoj se primjenjuju hladno miješani derivati emulzija, a za popravak aktivnih pukotina primjenjuju se vruće miješani termoplastični materijali.
- Samozacjeljivanje je učinkovita metoda kojom se povećava uporabni vijek asfaltnih kolnika i postiže izvedba glatkih kolnika koji olakšavaju sigurnost i udobnost prometa. Osim postojećih tradicionalnih metoda, nedavna dostignuća u provedbi samozacjeljivanja pružaju prednosti u smislu učinkovitosti saniranja pukotina. Posebno se ističu materijali za samozacjeljivanje (kao što su šupljikava vlakna i kapsule), kao i metode indukcijskog zagrijavanja i mikrovalnog zračenja.
- Metode za samozacjeljivanje asfaltnih kolnika mogu biti

učinkovite za sanaciju različitih vrsta pukotina. Konkretno, kapsule se mogu koristiti za popravak malih pukotina širine do 1 mm, šuplja vlakna mogu popraviti srednje velike pukotine širine do nekoliko milimetara, a mikrovaskularni sustavi mogu popraviti pukotine različitih širina. Indukcijsko i mikrovalno zagrijavanje se smatraju povoljnijim metodama za popravljavanje većih pukotina i drugih deformacija asfaltnog kolnika. Hibridno samozacjeljivanje je pogodno za različite vrste pukotina i sprječava njihovo daljnje širenje. Modifikacije polimera i ionomeri mogu učinkovito sanirati male do srednje velike pukotine i spriječiti širenje deformacija. Modifikacija supramolekularnih polimera se uglavnom primjenjuje za sanaciju malih do srednje velikih pukotina, gdje efekt

pamćenja oblika omogućuje asfaltnom kolniku da vrati svoj izvorni oblik nakon pojave deformacije. Ovisno o specifičnoj situaciji i vrsti pukotine, druge preporučene tehnologije odnose se na mikrobnu potaknutu precipitaciju kalcijevog karbonata, različita sredstva za obnavljanje i geosintetičke međuslojeve.

- Iako su neke primjene i aditivi u prethodnim istraživanjima detaljno ispitani u laboratorijima i na terenu, mnoge od tih tehnologija još uvijek su u ranim fazama razvoja i trebalo bi ih detaljnije istražiti. Preporučuju se daljnja istraživanja kako bi se unaprijedili naponi u otkrivanju učinkovitijih, praktičnijih, ekonomičnijih, održivih i ekološki prihvatljivih metoda i sredstava za sanaciju pukotina u asfaltu.

LITERATURA

- [1] Oner, J., Ozdas, F.: Investigation of textile waste usage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Građevinar*, 73 (2021) 5, pp. 469-481, <https://doi.org/10.14256/JCE.3135.2020>.
- [2] Cetin, A.: Laboratory performance of porous asphalt mixtures containing Ethylene Propylene Diene Monomer-EPDM, *Građevinar*, 74 (2022) 1, pp. 1-8, <https://doi.org/10.14256/JCE.3309.2021>.
- [3] Stojanović, M., Radonjanin, V., Malešev, M., Milović, T., Furgan, S.: Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials, *Građevinar*, 73 (2021) 8, pp. 791-804, <https://doi.org/10.14256/JCE.3161.2021>.
- [4] Nikolaidis, A.: Highway Engineering: Pavements, materials and control quality, CRC Press, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-13:978-1-4665-7997-2, Boca Raton, FL, 2014.
- [5] Cetin, A.: The effect of filler additives on moisture damage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *Građevinar*, 73 (2021) 12, pp. 1209-1221, <https://doi.org/10.14256/JCE.3321.2021>.
- [6] Roque, R., Zou, J., Hernando, D.: Cracking mechanisms in asphalt mixtures, *Advances in Asphalt Materials*, (2015), pp. 135-167, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100269-8.00005-2>.
- [7] Pradena, M., Miller, S., Staub, G., Díaz, M., Contreras, F.: Making the asphalt paving process explicit- A fundamental step for quality improvement, *Građevinar*, 72 (2020) 11, pp. 1031-1040, <https://doi.org/10.14256/JCE.2427.2018>.
- [8] O'Brien, L.G.: Evolution and benefits of preventive maintenance strategies, *Transportation Research Board*, 153 (1989), ISSN: 0547-5570.
- [9] Zaniewski, J.P., Mamlouk, M.S.: Pavement Maintenance Effectiveness: Preventive Maintenance Treatments: Participant's Handbook (No. FHWA-SA-96-027), United States, Federal Highway Administration, 1996.
- [10] Anderson, P.: Pavement Preventive Maintenance, Division of Local Assistance – Office Bulletin, <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/local-assistance/documents/ob/08-15/ob12-01.pdf>, 22.9.2022.
- [11] Pszczoła, M., Judycki, J., Dołycki, B.: Investigation of transverse cracking of asphalt pavements in the North-Eastern Poland, *Proceedings of the 6th International RILEM conference on cracking in pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention and case histories*, Chicago, USA, 2008., pp. 853-860
- [12] Fwa, T.F.: The handbook of highway engineering, Chapter 16, Highway Maintenance, CRC Press, Taylor & Francis Group, International Standard Book Number-10: 0-8493-1986-2, Boca Raton, FL, 2006.
- [13] Pavement Interactive: Pavement distresses, <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/longitudinal-cracking/>, 15.9.2022.
- [14] Tóth, C., Soós, Z., Igazvölgyi, Z.: Testing and interpreting permeability of asphalt mixes, *Građevinar*, 72 (2020) (5), pp. 395-400, <https://doi.org/10.14256/JCE.2532.2018>.
- [15] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W.: Hot mix asphalt materials, mixture design and construction, second edition, NAPA Research and Education Foundation, Lanham, MD, 1996.
- [16] Antunes, M.L., Fontul, S., Pinelo, A.M.: Anti-reflective cracking solutions for asphalt overlays: 8 years performance monitoring, *Proceedings of the 6th International RILEM conference on cracking in pavements: mechanisms, modeling, testing, detection, prevention and case histories*, Chicago, USA, 2008., pp. 791-798
- [17] Šimun, M., Mihalinač, S.: Asphalt pavement surface course with recycled rubber, *Građevinar*, 71 (2019) 8, pp. 639-650, <https://doi.org/10.14256/JCE.2703.2019>.
- [18] Sun, L.: Structural Behavior of Asphalt Pavements, Chapter 4 - General damage characteristics for asphalt pavement, Butterworth-Heinemann, 2016., pp. 243-295, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849908-5.00004-3>
- [19] Gedik, A.: A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements, *Resour. Conserv. Recycl.*, 161 (2020), pp. 104956, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104956>.
- [20] Gedik, A., Selcuk, S., Lav, A.H.: Investigation of recycled fluorescent lamps waste as mineral filler in highway construction: A case of asphaltic pavement layers, *Resour., Conserv. Recycl.*, 168 (2021), pp. 105290, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105290>.
- [21] Liao, M.C., Chen, J.S., Tsou, K.W.: Fatigue Characteristics of Bitumen-Filler Mastics and Asphalt Mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.*, 24 (2012) 7, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-)

- 5533.0000450.
- [22] Moghaddam, T.B., Karim, M.R., Syammaun, T.: Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles, *Constr. Build. Mater.*, 34 (2012), pp. 236–242, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054>.
- [23] Cheng, D., Little, D., Lytton, R., Holste, J.: Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures, *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 1 (2002), pp. 44–53
- [24] Tahami, S.A., Arabani, M., Mirhosseini, A.F.: Usage of two biomass ashes as filler in hot mix asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 170 (2018), pp. 547–556, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.102>.
- [25] KGM.: A guideline to crack sealing in bituminous hot mix coatings, Turkey General Directorate of Highways(KGM),<https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Baskanliklar/BaskanliklarTeknikArastirma/BitumluSicakKarisim2021.pdf>, 19.9.2022.
- [26] Zhang, L., Liu, Q., Li, H., Norambuena-Contreras, J., Wu, S., Bao, S., Shu, B.: Synthesis and characterization of multi-cavity Calcium alginate capsules used for self-healing in asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 211 (2019), pp. 298–307, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.224>
- [27] Chung, K., Lee, S., Park, M., Yoo, P., Hong, Y.: Preparation and characterization of microcapsule-containing self-healing asphalt, *J. Ind. Eng. Chem.*, 29 (2015), pp. 330–337, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.04.011>.
- [28] Xue, B., Wang, H., Pei, J., Li, R., Zhang, J., Fan, Z.: Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 135 (2017), pp. 641–649, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.165>
- [29] Xu, S., Tabakovic, A., Liu, X., Schlangen, E.: Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic, *Constr. Build. Mater.*, 169 (2018), pp. 379–387, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.046>
- [30] Sun, D., Pang, Q., Zhu, X., Tian, Y., Lu, T., Yang, Y.: Enhanced Self-Healing Process of Sustainable Asphalt Materials Containing Microcapsules, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 5 (2017) 11, pp. 9881–9893, <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01850>
- [31] Wang, Y., Wu, R., Feng, M., Zhang, G., Zhang, C., Hao, P.: Synthesis of microcapsules with waste oil core and application in self-healing asphalt, *Pet. Sci. Technol.*, 38 (2020) 3, pp. 203–209, <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1702679>.
- [32] Bao, S., Liu, Q., Li, H., Zhang, L., Barbieri, D.M.: Investigation of the Release and Self-Healing Properties of Calcium Alginate Capsules in Asphalt Concrete under Cyclic Compression Loading, *J. Mater. Civ. Eng.*, 33 (2021) 1, pp. 04020401, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003517](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003517)
- [33] Liu, Z.: Preparation of microcapsule and its influence on self-healing property of asphalt, *Pet. Sci. Technol.*, 37 (2019) 9, pp. 1025–1032, <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1570253>
- [34] Zhang, H., Bai, Y., Cheng, F.: Rheological and self-healing properties of asphalt binder containing microcapsules, *Constr. Build. Mater.*, 187 (2018), pp. 138–148, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.172>.
- [35] Xu, S., Liu, X., Tabakovic, A., Schlangen, E.: Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete, *Materials*, 12 (2019) 1, pp. 1–13, <https://doi.org/10.3390/ma12010168>.
- [36] Aguirre, M.A., Hassan, M.M., Shirzad, S., Cooper, S., Mohammad, L.N., Negulescu, I.I.: Laboratory Testing of Self-Healing Fibers in Asphalt Mixtures Prepared with Recycled Materials, *Transp. Res. Rec.*, 2673 (2019) 4, pp. 513–523, <https://doi.org/10.1177/0361198119836978>.
- [37] Shu, B., Wu, S., Dong, L., Norambuena-Contreras, J., Yang, X., Li, C., Liu, Q., Wang, Q.: Microfluidic synthesis of polymeric fibers containing rejuvenating agent for asphalt self-healing, *Constr. Build. Mater.*, 219 (2019), pp. 176–183, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.178>.
- [38] Tabakovic, A., Post, W., Cantero, D., Copuroglu, O., Garcia, S.J., Schlangen, E.: The reinforcement and healing of asphalt mastic mixtures by rejuvenator encapsulation in alginate compartmented fibres, *Smart Mater. Struct.*, 25 (2016) 8, pp. 084003, <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084003>.
- [39] Zhang, X.L., Su, J. F., Guo, Y.D., Wang, X.Y., Fang, Y., Ding, Z., Han, N.X.: Novel vascular self-nourishing and self-healing hollow fibers containing oily rejuvenator for bitumen, *Constr. Build. Mater.*, 183 (2018), pp. 150–162, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.181>.
- [40] Su, J.F., Zhang, X.L., Guo, Y.D., Wang, X.F., Li, F.L., Fang, Y., Ding, Z., Han, N.X. Experimental observation of the vascular self-healing hollow fibers containing rejuvenator states in bitumen, *Constr. Build. Mater.*, 201 (2019), pp. 715–727, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.001>.
- [41] Guo, Y.D., Xie, X. M., Su, J.F., Mu, R., Wang X.F., Jin, H.P., Fang, Y., Ding, Z., Lv, L.Y., Han, N.X.: Mechanical experiment evaluation of the microvascular self-healing capability of bitumen using hollow fibers containing oily rejuvenator, *Constr. Build. Mater.*, 225 (2019), pp. 1026–1035, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.036>.
- [42] Anupam, B.R., Sahoo, U.C., Chandrappa A.K.: A methodological review on self-healing asphalt pavements, *Constr. Build. Mater.*, 321 (2022), pp. 126395, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126395>.
- [43] Meijide, B.G., Ajam, H., Lastra-González, P., Garcia, A.: Effect of air voids content on asphalt self-healing via induction and infrared heating, *Constr. Build. Mater.*, 126 (2016), pp. 957–966, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.115>
- [44] Liu, Q., Schlangen, E., García, A., Van de Ven, M.: Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete, *Constr. Build. Mater.*, 24 (2010) 7, pp. 1207–1213, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.019>.
- [45] Liu, Q., Wu, S., Schlangen, E.: Induction heating of mastic asphalt for crack control, *Constr. Build. Mater.*, 41 (2013), pp. 345–351, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.075>.
- [46] Liu, Q., Schlangen, E., Van de Ven, M.: Induction Heating of Porous Asphalt Concrete Beams on an Elastic Foundation, *J. Mater. Civ. Eng.*, 25 (2013) 7, pp. 880–885, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000677](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000677).
- [47] Xu, H., Wu, S., Li, H., Zhao, Y., Lv, Y.: Study on recycling of steel slags used as coarse and fine aggregates in induction healing asphalt concretes, *Materials*, 13 (2020) 4, <https://doi.org/10.3390/ma13040889>.
- [48] Liu, Q., Yu, W., Wu, S., Schlangen, E., Pan, P.: A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt, *Constr. Build. Mater.*, 144 (2017), pp. 663–670, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.195>.
- [49] Liu, Q., Schlangen, E., Van de Ven, M.: Characterization of the material from the induction healing porous asphalt concrete trial

- section, *Mater. Struct. Constr.*, 46 (2013) 5, pp. 831–839, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9936-9>.
- [50] Pamulapati, Y., Elseifi, M.A., Cooper, S.B., Mohammad, L.N., Elbagalati, O.: Evaluation of self-healing of asphalt concrete through induction heating and metallic fibers, *Constr. Build. Mater.*, 146 (2017), pp. 66–75, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.064>
- [51] Vila-Cortavitarte, M., Jato-Espino, D., Castro-Fresno, D., Calzada-Pérez, M.: Self-healing capacity of asphalt mixtures including by-products both as aggregates and heating inductors, *Materials*, 11 (2018) 5, <https://doi.org/10.3390/ma11050800>.
- [52] Yoo, D.Y., Kim, S., Kim, M.J., Kim, D., Shin, H.O.: Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials, *J. Mater. Res. Technol.*, 8 (2019) 1, pp. 827–839, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.07.001>.
- [53] Menozzi, A., Garcia, A., Partl, M.N., Tebaldi, G., Schuetz, P.: Induction healing of fatigue damage in asphalt test samples, *Constr. Build. Mater.*, 74 (2015), pp. 162–168, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.034>.
- [54] Lou, B., Sha, A., Li, Y., Wang, W., Liu, Z., Jiang, W., Cui, X.: Effect of metallic-waste aggregates on microwave self-healing performances of asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.*, 246 (2020), pp. 118510, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118510>.
- [55] Norambuena-Contreras, J., Garcia, A.: Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating, *Mater. Des.*, 106 (2016), pp. 404–414, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.095>.
- [56] Sun, Y., Wu, S., Liu, Q., Zeng, W., Chen, Z., Ye, Q., Pan, P.: Self-healing performance of asphalt mixtures through heating fibers or aggregate, *Constr. Build. Mater.*, 150 (2017), pp. 673–680, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.007>.
- [57] Lou, B., Sha, A., Barbieri, D.M., Liu, Z., Zhang, F., Jiang, W.: Improved microwave heating uniformity and self-healing properties of steel slag asphalt containing ferrite filler, *Mater. Struct. Constr.*, 54 (2021) 1, pp. 1–14, <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01577-7>.
- [58] Yildiz, K., Atakan, M.: Improving microwave healing characteristic of asphalt concrete by using fly ash as a filler, *Constr. Build. Mater.*, 262 (2020), pp. 120448, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120448>.
- [59] Fakhri, M., Bahmai, B.B., Javadi, S., Sharafi, M.: An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives, *J. Clean. Prod.*, 253 (2020), pp. 119963, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119963>.
- [60] González, A., Norambuena-Contreras, J., Storey, L., Schlagen, E.: Self-healing properties of recycled asphalt mixtures containing metal waste: An approach through microwave radiation heating, *J. Environ. Manage.*, 214 (2018), pp. 242–251, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.001>.
- [61] Li, C., Wu, S., Chen, Z., Tao, G., Xiao, Y.: Enhanced heat release and self-healing properties of steel slag filler based asphalt materials under microwave irradiation, *Constr. Build. Mater.*, 193 (2018), pp. 32–41, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.193>.
- [62] Zhu, X., Cai, Y., Zhong, S., Zhu, J., Zhao, H.: Self-healing efficiency of ferrite-filled asphalt mixture after microwave irradiation, *Constr. Build. Mater.*, 141 (2017), pp. 12–22, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.145>.
- [63] Wan, P., Liu, Q., Wu, S., Zhao, Z., Chen, S., Zou, Y., Rao, W., Yu, X.: A novel microwave induced oil release pattern of calcium alginate/nano-Fe3O4 composite capsules for asphalt self-healing, *J. Clean. Prod.*, 297 (2021), pp. 126721, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126721>.
- [64] Zhou, L., Huang, W., Zhang, Y., Lv, Q., Yan, C., Jiao, Y.: Evaluation of the adhesion and healing properties of modified asphalt binders, *Constr. Build. Mater.*, 251 (2020), pp. 119026, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119026>.
- [65] Badroodi, S.K., Keymanesh, M.R., Shafabakhsh, G.: Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior, *Constr. Build. Mater.*, 246 (2020), pp. 117558, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117558>.
- [66] Chung, K., Lee, S., Cho, W., Seo, J., Hong, Y.: Rheological analysis of self-healing property of microcapsule-containing asphalt, *J. Ind. Eng. Chem.*, 64 (2018), pp. 284–291, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.03.026>.
- [67] Zhou, X., Sun, B., Wu, S., Zhang, X., Liu, Q., Xiao, Y.: Evaluation on Self-healing Mechanism and Hydrophobic Performance of Asphalt Modified by Siloxane and Polyurethane, *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.*, 34 (2019) 3, pp. 630–637, <https://doi.org/10.1007/s11595-019-2097-8>.
- [68] Zhou, X., Ma, B., Wei, K., Wang, X.: Deformation recovery properties of asphalt mixtures with shape memory epoxy resin., *Constr. Build. Mater.*, 268 (2021), pp. 121193, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121193>.
- [69] Lanzara, G., Yoon, Y., Liu, H., Peng, S., Lee, W.I.: Carbon nanotube reservoirs for self-healing materials, *Nanotechnology*, 20 (2009) 3, pp. 335704, <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/33/335704>.
- [70] Williams, K.A., Boydston, A.J., Bielawski, C.W.: Towards electrically conductive, self-healing materials, *J. R. Soc. Interface*, 4 (2007) 13, pp. 359–362, <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0202>.