

Reologická a molekulární charakterizace asfaltu modifikovaného odpadní kávovou sedlinou s využitím DSR, FTIR a ^1H -NMR

Tato studie se zaměřuje na výzkum vlivu využití kávové sedliny (SCG) na reologické a molekulární vlastnosti asfaltového pojiva. Jako referenční pojivo a základ pro výrobu tří variant pojiva upraveného („modifikovaného“) použitou kávovou sedlinou s různým obsahem tohoto přírodního aditiva (5 %, 10 % a 15 % hm. pojiva) byl použit silniční asfalt. Reologická charakterizace byla provedena pomocí dynamického smykového reometru (DSR) prostřednictvím faktoru trvalé deformace ($G^/\sin\delta$) a faktoru únavového porušení ($G^*\times\sin\delta$), zatímco molekulární charakterizace byla provedena dvěma různými spektroskopickými technikami, a to Fourierovou transformací infračerveného záření (FTIR) a protonovou nukleární magnetickou rezonancí (^1H -NMR).*

Výše uvedené hodnocení pomocí více technik bylo provedeno před a po použití zkoušky krátkodobého laboratorního stárnutí metodou RTFOT, aby se posoudil vliv tohoto účinku na chování asfaltového pojiva. Bylo zjištěno, že použitá kávová sedlina zlepšuje odolnost asfaltu proti trvalé deformaci na úkor únavového porušení, resp. odolnosti proti únavě. Kromě toho chemická interakce mezi asfaltem a použitou kávovou sedlinou naznačuje mechanismus chemické bio-modifikace. Kromě toho by se FTIR a ^1H -NMR spektroskopické techniky měly používat doplňkově, protože každá z nich nabízí odlišné analytické informace. A konečně, hodnocení citlivosti pojiv ke stárnutí nebylo průkazné u různých zvolených indexů stárnutí, což přibližuje poměrnou složitost této problematiky při rozlišování mezi fyzikálně-chemickými a reologickými hodnotícími parametry.

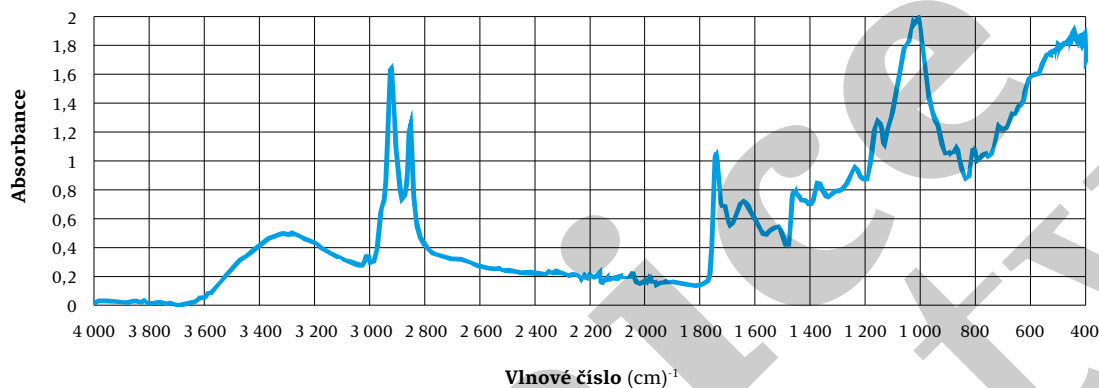
Používání materiálů na přírodní bázi (mnohdy označovaných jako bio-materiály) při výstavbě vozovek si získalo pozornost kvůli dnes sledovaným negativním dopadům produktů na bázi ropy, jako je asfalt, na životní prostředí [1]. Přírodní materiály rostlinného původu, jako je olej z řepky, z kešu oříšků, estery z ligninu nebo olej z SCG, byly zavedeny jako potenciálně vhodné bio-modifikátory, které mění některé vlastnosti asfaltů [2–4]. Současně se některé z těchto materiálů dneska sledují v rámci možnosti jejich využití při rozvoji bio-pojiv.

V uplynulých 5–10 letech byly některé bio-materiály použity jako modifikátory konvenčního asfaltového pojiva za účelem zlepšení jeho různých vlastností. Například bylo zjištěno, že sójový olej a bavlníkový olej zlepšují odolnost asfaltu proti únavě materiálu a teplotně indukovaným trhlinám [10–11]. Dále vlákna kukuřičných stonků [12], řasy [13], popel z datlovníku [14] a kokosová vlákna [15] prokázaly potenciál pro zvýšení odolnosti po-

jiva proti tvorbě kolejí a následně i odolnosti asfaltových směsí při vysokých teplotách. Další materiály byly použity jako činidla proti zhoršení citlivosti k účinkům vody a pro zlepšení přilnavosti mezi kamenivem a pojivy, jako jsou zbytky z výroby biopaliv [16], amidy mastných kyselin odvozené z oleje získaného z bavlníkových semen [17] a popel z olivových slupek [18]. Stárnutí bylo také podrobeno výzkumu jako oxidační jev z reologického a fyzikálně-chemického hlediska. Zejména se některé studie zaměřily na začlenění přírodních materiálů rostlinné báze jako způsobu zmírnění oxidačního stárnutí asfaltového pojiva, které vede k poruchám ve vozovkách, jako jsou únavové nebo teplotně indukované trhliny. Například prasečí hnůj prokázal schopnost působit jako inhibitor stárnutí v ochraně proti UV záření [19]. Bio-olej z pyrolýzy kukuřičných stébel má také schopnost inhibovat stárnutí asfaltového pojiva [20]. Jeho vlastnosti proti stárnutí však vykazovaly menší potenciál ve srovnání s prasečím hnojem. V některých případech byly bio-materiály použity jako modifikátory v již modifikovaných pojivech s kopolymerem, jako je SBS. Například epoxidovaný sójový olej byl použit v asfaltových pojivech modifikovaných SBS ke zkoumání chování asfaltu během krátkodobého stárnutí. Bylo zjištěno, že olej dokázal snížit potřebné množství SBS, a dokonce s ním chemicky reagovat a vázat se [21]. Jedním z nejrozšířenějších biomateriálů známých pro svou schopnost bránit oxidaci asfaltu je potom lignin a zejména odvozené estery. Lignin je biopolymer nacházející se v rostlinách. Jeho struktura se může lišit v závislosti na zkoumané rostlině, ale jedním ze společných prvků všech ligninů jsou fenolové funkční skupiny, které mají tendenci působit jako specifická chemická látka, a tím zpomalovat rychlost oxidace asfaltového pojiva. Existují různé typy ligninu v závislosti na metodě extrakce, jako například Kraft,

Tabulka 1: Metriky reologických vlastností

Pojivo	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	$G^*\times\sin\delta$ (Pa)	$G^*/\sin\delta$ (Pa)	$G^*\times\sin\delta$ (Pa)
	Nezestárnutý		RTFOT stárnutý	
70/100	2,67E+03	5,35E+05	5,21E+03	8,86E+05
SCG-5	3,51E+03	5,71E+05	7,42E+03	9,42E+05
SCG-10	5,22E+03	6,06E+05	1,36E+04	9,44E+05
SCG-15	1,03E+04	7,35E+05	5,48E+04	1,06E+06



Obrázek 1: Výsledek FTIR spektrální analýzy rozpuštěné kávové sedliny

Organosolv, sodné ligniny a lignosulfonáty [22]. Vliv ligninu na náchylnost ke stárnutí se však může lišit a závisí na řadě faktorů, jako je molekulární struktura ligninu, dávkování ligninu a použitý protokol stárnutí [23].

V případě prezentované studie byl v rámci mezinárodní spolupráce mezi Řeckem, ČR a Rakouskem zkoumán prášek a popel z kávové sedliny s různým obsahem obou těchto složek, resp. s různým zastoupením v asfaltovém pojivu. Přitom platí, že popel SCG vykazoval lepší výsledky, pokud jde o odolnost proti trvalé deformaci a únavě nebo pokud je sledován dopad na skladovací stabilitu [5]. Podobné výsledky byly prokázány také u biocharu získaného z SCG [6]. Obecně se účinky přírodních materiálů rostlinného původu hodnotí pomocí různých zkušebních protokolů, které poskytují doplňující poznatky o chování pojiva. Tato studie tedy představuje víceetapovou analýzu asfaltů modifikovaných SCG, kombinující reologii pomocí DSR s FTIR a $^1\text{H-NMR}$ spektroskopii pro chemickou analýzu, provedené před a po stárnutí metodou RTFOT, s cílem prozkoumat vliv SCG na charakteristiky asfaltového pojiva.

Materiály a metody

Jako referenční asfaltové pojivo a základ pro výrobu pojiv upravených/modifikovaných SCG byl použit běžný silniční asfalt s penetrační třídou 70/100. Použitá kávová sedlina (SCG), která byla použita coby modifikátor rostlinného původu, byla přidávána ve třech zvolených koncentracích: 5 %, 10 % a 15 % hm. asfaltového pojiva (SCG-5, SCG-10, SCG-15). Mikrostrukturální charakteristiky a distribuce velikosti částic SCG, konvenční vlastnosti referenčních pojiv modifikovaných SCG a parametry

protokolu vzájemného mísení obou složek lze nalézt v předchozí publikované odborné práci [7].

Odolnost asfaltů proti trvalé deformaci a únavovému porušení byla hodnocena pomocí DSR prostřednictvím poměrových charakteristik $G^*/\sin\delta$ a $G^*\times\sin\delta$ při 60 °C, resp. 30 °C. Molekulární charakterizace byla provedena pomocí FTIR a $^1\text{H-NMR}$ spektroskopie. Analýzy FTIR byly provedeny v rozsahu 4 000–400 cm^{-1} s rozlišením 4 cm^{-1} a provedením 24 skenů na čtyřech opakováních pro každé pojivo se čtyřmi opakováními, přičemž plná základní sada integrovala po normalizaci specifické oblasti zájmu, které tvoří 984–1 066 cm^{-1} (sulfoxidy, $A_{\text{S=O}}$), 1 666–1 746 cm^{-1} (karbonyly, $A_{\text{C=O}}$) a 1 130–1 330 cm^{-1} (polární molekulární částice, A_{pol}), přičemž součet byl uveden jako Acelkem. $^1\text{H-NMR}$ analýzy byly provedeny dvakrát pro každé pojivo, přičemž bylo integrováno pět spektrálních oblastí [8]. Náchylnost ke stárnutí byla hodnocena pomocí 10 různých indexů stárnutí, které byly vypočteny jako poměry nebo rozdíly mezi vzorky nezestárnutého pojiva a pojiva po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT.

Výsledky a diskuse

Reologická charakterizace

Reologická analýza ukázala, že SCG zlepšuje odolnost asfaltu proti trvalé deformaci, přičemž 5 % SCG zvyšuje $G^*/\sin\delta$ z 2,67E+03 Pa na 3,51E+03 Pa před stárnutím (tabulka 1). Podobný trend vykazovala i pojiva krátkodobě zestárnutá metodou RTFOT. Navzdory lepšímu chování při vysokých teplotách měla pojiva modifikovaná SCG mírně nižší odolnost proti únavě, a v případě 15% SCG dokonce došlo ke zvýšení $G^*\times\sin\delta$ jen s velmi malým nárůstem z 5,35E+05 Pa na 7,35E+05 Pa.

Molekulární charakteristika

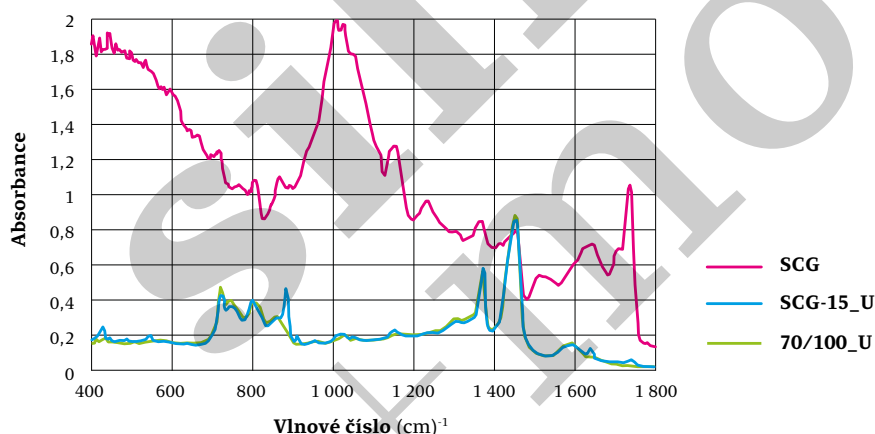
Výše uvedený obrázek 1 ukazuje charakteristické FTIR spektrum, a to pro vysušenou kávovou sedlinu použitou v tomto článku. Široký pík v hodnotě $3\,285\text{ cm}^{-1}$ ukazuje na valenční vibraci (protažení) -OH skupiny vycházející z ligninu nebo z vázané vody, zatímco pík v hodnotě $3\,000\text{ cm}^{-1}$ odpovídá valenční vibraci -NH skupiny vycházející z kofeinu. Píky v hodnotách $2\,922\text{ cm}^{-1}$ a $2\,854\text{ cm}^{-1}$ naznačují existenci lipidů (valenční vibrace -CH₃ a -CH₂). Ostrý pík v hodnotě $1\,750\text{ cm}^{-1}$ odráží karbonylové skupiny (estery, karboxylové kyseliny, aldehydy) v hemicelulóze. Estery se nacházejí v hodnotě spektra $1\,163\text{ cm}^{-1}$ (C-O valenční vibrace). Aromatické valenční vibrace C=C guajakolu v ligninu se objevují v hodnotách $1\,625\text{ cm}^{-1}$, $1\,518\text{ cm}^{-1}$ a $1\,237\text{ cm}^{-1}$, zatímco vibrace -CH₃ a -CH₂- z ligninu/celulózy je patrná v hodnotách spektra $1\,445\text{ cm}^{-1}$ a $1\,377\text{ cm}^{-1}$. Silné absorpce při $1\,010\text{--}1\,030\text{ cm}^{-1}$ a protažení v hodnotě $1\,163\text{ cm}^{-1}$ odpovídají vazbám C-O-C u aromatických cyklických sloučenin polysacharidů. Výše uvedená zjištění jsou v souladu s příslušnou literaturou [9].

V asfaltovém pojivu byly po tzv. bio-modifikaci kávovou sedlinou vysledovány určité strukturní změny (obrázek 2). Byly pozorovány tři nové píky v hodnotách spektra $1\,750\text{ cm}^{-1}$, $1\,650\text{ cm}^{-1}$ a 911 cm^{-1} , které odpovídají vazbám C=O a C=C. Kromě toho se vytvořil zcela nový pík v hodnotě 885 cm^{-1} , který se částečně překrývá s píkem v hodnotě 850 cm^{-1} referenčního silničního asfaltu. Výsledky FTIR spektrální analýzy ukazují, že bio-modi-

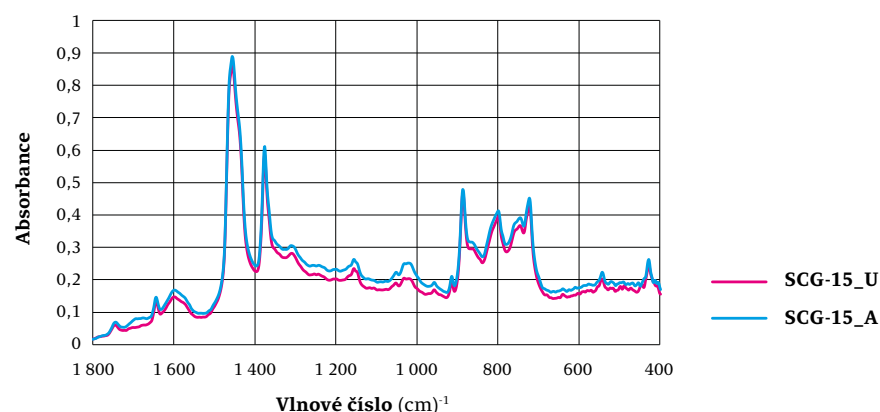
fikace je fyzikální, protože nové píky v asfaltovém pojivu upraveném kávovou sedlinou pocházejí z bio-modifikátoru a žádné další píky se nevytvořily.

Metoda krátkodobého stárnutí RTFOT vedla u pojiva SCG-15 ke znatelnému zvýšení absorpce v karbonylové, sulfoxidové a celkové spektrální oblasti mezi $1\,800\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ (obrázek 3). Toto chování je v souladu s dobře známými mechanismy oxidačního stárnutí asfaltů, které zahrnují tvorbu polárních sloučenin a vnikání heteroatomů, zejména kyslíku, do molekulární struktury. Kromě toho lze nárůst absorpce ve spektrální oblasti mezi $1\,800\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ vysvětlit pohledem na spektrum čisté SCG, kde je pro tuto oblast patrná zvýšená absorpce. Kromě těchto změn zůstávají spektrální profily nezestárnutých a krátkodobě zestárklých vzorků z hlediska složení funkčních skupin do značné míry srovnatelné.

Množství okysličených a vysoce polárních funkčních skupin a sloučenin přítomných v SCG (obrázek 1) se odrazilo ve velikosti integrovaných absorpčních ploch odpovídajících sulfoxidové a karbonylové oblasti (tabulka 2). S vyšším obsahem biomodifikátoru byl pozorován progresivní nárůst těchto ploch, což naznačuje přímý vliv navázaných složek SCG na chemické složení asfaltového pojiva. Rozdíl mezi nemodifikovaným asfaltem a pojivy modifikovanými biosložkou (kávovou sedlinou) byl zvláště výrazný u vzorků vystavených krátkodobému stárnutí RTFOT. Nárůst $A_{(\text{polární})}$ u pojiva SCG-15 lze přičíst především



Obrázek 2: FTIR spektrum nezestárnutého referenčního asfaltu a pojiva SCG-15



Obrázek 3: FTIR spektra nezestárnutého a RTFOT stárnutého pojiva SCG-15

Tabulka 2: Integrované plochy FTIR

Chemické vazba	A _{pol}	A _{S=O}	A _{C=O}	A _{celkem}	A _{pol}	A _{S=O}	A _{C=O}	A _{celkem}
	Nezestárnutý				RTFOT stárnutý			
70/100	44,30	14,10	2,87	61,27	45,30	15,70	3,68	64,69
SCG-5	43,39	14,51	3,30	61,20	46,23	16,42	4,37	67,01
SCG-10	43,93	14,75	3,73	62,42	48,42	17,40	4,94	70,75
SCG-15	44,87	15,29	4,12	64,28	49,82	18,12	5,49	73,43

Tabulka 3: 1H-NMR rozložení protonů

Pojivo	H _γ	H _β	H _α	H _{ol}	H _{ar}	H _γ	H _β	H _α	H _{ol}	H _{ar}
	Nezestárnutý					RTFOT stárnutý				
70/100	19,1	62,5	12,5	0,1	5,9	20,0	62,1	12,5	0,0	5,4
SCG-15_un	23,2	61,2	9,8	0,0	5,8	27,4	59,5	6,8	0,0	6,4
SCG-15_filt	23,3	63,1	7,3	0,0	6,3	24,1	61,6	7,9	0,2	6,2

Tabulka 4: Reologické a fyzikálně-chemické indexy stárnutí

Pojivo	AI _{G*/sin(δ)}	AI _{(G*×sin(δ))}	AI _{pol}	AI _{S=O}	AI _{C=O}	AI _{celkem}	AI _{pol}	AI _{S=O}	AI _{C=O}	AI _{celkem}
	Podílový index					Rozdílový index				
70/100	1,95	1,66	1,02	1,11	1,28	1,06	1,00	1,60	0,81	3,41
SCG-5	2,12	1,65	1,07	1,13	1,32	1,10	2,84	1,90	1,07	5,82
SCG-10	2,61	1,56	1,10	1,18	1,32	1,13	4,48	2,64	1,21	8,34
SCG-15	5,31	1,44	1,11	1,19	1,33	1,14	4,95	2,83	1,37	9,15

množství přidané SCG, přičemž stárnutí k tomuto nárůstu přispělo jen v nepatrné míře.

Bio-modifikační proces vedl ke zvýšení relativního zastoupení methylových protonů (H_γ) a k současnému poklesu methylenových (H_β) a α-alkylových protonů (H_α) před filtrací (tabulka 3). Signály aromatických protonů (H_{ar}) nevykazovaly konzistentní trend, zatímco olefinické protony (H_{ol}) v analyzovaných vzorcích téměř chyběly. Filtrace pojiva SCG-15 vedla ke zvýšení intenzity methylenových protonů, což se přičítá vzniku nové rezonance při 1,58 ppm. Tento signál se připisuje adsorpci atmosférické vlhkosti na vláknitý bavlněný zátkový filtr, což tedy vlastní výsledek mírně zkresluje. Stárnutí vyvolalo srovnatelné strukturní změny v obou pojivech, především zvýšení intenzity methylenových protonů a snížení signálů methylenových protonů. Rozdílné trendy však byly pozorovány u aromatických protonů: zatímco jejich intenzita se v referenčním asfaltovém pojivu při stárnutí snížila, pojivo SCG-15 vykazovalo před filtrací zvýšení obsahu aromatických protonů.

Náchylnost ke stárnutí

Hodnocení náchylnosti ke stárnutí ukázalo protichůdné trendy (tabulka 4). Indexy stárnutí založené na charakteristice G*×sinδ ukázaly vyšší odolnost vůči stárnutí u pojiv modifikovaných SCG se zvyšujícím se obsahem kávové sedliny (např. 1,56 pro

SCG-10 vs. 1,66 pro 70/100). Naproti tomu fyzikálně-chemické charakteristiky a ukazatel G*/sinδ vedly v případě indexů stárnutí k nárůstu jejich hodnoty v závislosti na přídatku SCG. Ze čtyř fyzikálně-chemických indexů stárnutí se ukazuje, že pravděpodobně A_(S=O) a A_(C=O) lépe popisují chování asfaltového pojiva při jeho stárnutí, zatímco A_(polární) a A_{celkový} lze využít k popisu strukturních změn způsobených přidáním SCG. Tyto výsledky zdůrazňují, že citlivost na stárnutí závisí na zvolené výpočetní metodě indexu stárnutí, což odráží selektivní povahu fyzikálně-chemických versus reologických parametrů.

Závěry

Použití modifikační přísady SCG vedlo ke zlepšení odolnosti asfaltu proti trvalé deformaci, bohužel toto zlepšení bylo na úkor jeho únavového chování. Bio-modifikace se v případě zvoleného silničního asfaltu a kávové sedliny projevuje v podobě fyzikálního mísení, nikoliv chemickou interakcí. Hodnocení náchylnosti ke stárnutí nebylo průkazné, protože výsledek silně závisel na zvolené metodě hodnocení. Komplexní charakterizace asfaltového pojiva upraveného přísadou na rostlinné bázi vyžaduje multidisciplinární pohled, který integruje reologické i chemické analytické přístupy, které umožní mnohem lepší porozumění nejen potenciálu, ale i změnám v chování asfaltového pojiva.

Poděkování: Výzkumné práce realizované v rámci činnosti ČVUT v Praze byly podpořeny Ministerstvem životního prostředí jako součást projektu CirkArena, projekt č. CZ.10.03.01/00/22_003/0000045

Stavros Kalampokis, Alexis D. Kouvelas, Ioannis N. Lykakis, Evangelos Manthos
Aristotle University of Thessaloniki (Řecko)
Johannes Mirwald, Bernhard Hofko
Institute of Transportation, TU Vienna (Rakousko)
Jan Valentin ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb

Literatura

- [1] Ding H., Wang H., Qu X., Varveri A., Gao J., You Z.: Towards an understanding of diffusion mechanism of bio-rejuvenators in aged asphalt binder through molecular dynamics simulation. *Journal of Cleaner Production* 299:126927, 2021.
- [2] Mirwald J., Lorenz M., Stüwe S., Hofko B.: Evaluating laboratory long-term ageing behaviour of bio-binders (Hodnocení laboratorního chování biosložek při dlouhodobém stárnutí). *Construction and Building Materials* 490:142530, 2025.
- [3] Ren S., Zhang Y., Pipintakos G., Xu S., Liu Q., Van Den Bergh, W.: Elucidating the role of lignin in bio-rejuvenated bitumen: Insights into rheological and anti-aging properties via experiments and molecular simulations (Objasnění úlohy ligninu v biobetonu: Pohled na reologické vlastnosti a vlastnosti proti stárnutí pomocí experimentů a molekulárních simulací). *Fuel* 395:135244, 2025.
- [4] Zou X., Xie H., Li J., Jing H., Li H., Li Z., Wang X.: Innovative application of coffee grounds oil as an asphalt modifier: extraction, preparation, and rheological properties (Inovativní použití oleje z kávové sedliny jako modifikátoru asfaltu: extrakce, příprava a reologické vlastnosti). *Case Studies in Construction Materials*, 04012, 2024.
- [5] Arabani M., Moghaddam Z. M.: A comparative study into the effect of spent coffee powder and ash on the improving the mechanical properties of bitumen (Srovnávací studie vlivu kávového prášku a popela na zlepšení mechanických vlastností asfaltu). *Construction and Building Materials* 449:138319, 2024.
- [6] Chen Z., Yu D., Feng Z.: Aging Resistance and Microcharacteristics of Asphalt Modified by Biochar from Spent Coffee Grounds [Odolnost proti stárnutí a mikrocharakteristiky asfaltu modifikovaného biočarem z odpadní kávové drti]. *Journal of Materials in Civil Engineering* 36:9, 2024.
- [7] Kalampokis S., Valentin J., Manthos E., Konstantinidis A. A.: Investigation of Rheological Properties and Ageing Susceptibility of Bitumen Bio-Modified with Spent Coffee Grounds (Zkoumání reologických vlastností a náchylnosti asfaltu modifikovaného biočarem ze spálené kávové drti ke stárnutí). *Construction Materials* 5(3):45, 2025.
- [8] Rossi C. O., Caputo P., De Luca G., Maiuolo L., Eskandarsefat S., Sangiorgi C.: ¹H-NMR Spectroscopy: A possible approach to advanced bitumen characterization for industrial and paving applications. *Applied Sciences* 8(2):229, 2018.
- [9] Jóźwiak T., Filipkowska U., Struk-Sokolowska J., Bryszewski K., Trzciński K., Kuźma J., Ślimkowska M.: The use of spent coffee grounds and spent green tea leaves for the removal of cationic dyes from aqueous solutions. *Scientific Reports* 11(1), 2021.
- [10] Elkashef M., Williams R.C.: Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator. *Constr. Build. Mater.* 2017.
- [11] Chen M., Xiao F., Putman B., Leng B., Wu S.: High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Constr. Build. Mater.* 59, 10–16, 2014.
- [12] Chen Z., Yi J., Chen Z., & Feng D. Properties of asphalt binder modified by corn stalk fiber. *Constr. Build. Mater.* 212, 225–235, 2019.
- [13] Escobar Medina F., Rivera Armenta J., Hernández Zamora G., Salazar Cruz B., Zapién Castillo S., Flores-Hernández C.: Sargassum-Modified Asphalt: Effect of Particle Size on Its Physicochemical, Rheological, and Morphological Properties. *Sustainability*, 2021.
- [14] Khan M.: Performance Evaluation of Dates Palm Ash (DPA) Modified Bitumen for Sustainable Pavement Construction. In *15th International Conference on Environmental Science and Technology*. Rhodes, Greece. 2017.
- [15] Panda M., Suchismita A., Giri J.: Utilization of Ripe Coconut Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixes. *Int. J.*
- [16] Ghabchi R., Castro M.: Evaluation of a biofuel residue-derived recycling agent with a low carbon footprint. *Transp. Eng.* 2021.
- [17] Nogueira R., Soares J., Soares S.: Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts. *Constr. Build. Mater.*, 223, p. 1 145–1 153, 2019.
- [18] Al Qadi A., Khedaywi T., Haddad M., Al-Rababa'ah O.: Investigating the Effect of Olive Husk Ash on the Properties of Asphalt Concrete Mixture. *Ann. Chim. Sci. Mater.*, 45(1), p. 11–15, 2021.
- [19] Hosseinneshad S., Zadsheir M., Yu X., Yin H., Sharma B., Fini E.H.: Differential effects of ultraviolet radiation and oxidative aging on bio-modified binders. *Fuel*, 251, p. 45–56, 2019.
- [20] Fini E.H., Oldham D., Buabeng F.S., Nezhad S.H.: Investigating the aging susceptibility of bio-modified asphalts. *Airfield and Highway Pavements*, 2015, p. 62–73.
- [21] Li J., Zhang F., Liu Y., Muhammad Y., Su Z., Meng F., Chen X. Preparation and properties of soybean bio-asphalt/SBS modified petroleum asphalt. *Constr. Build. Mater.*, 201, p. 268–277, 2019.
- [22] Gaudenzi E., Cardone F., Lu X., Canestrari F.: The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review. *Constr. Build. Mater.*, 2023.
- [23] Leischner S., Tolsdorf L., Kamratowsky E., Mangalath Shine A., Zeissler A., Canon Falla G.: Effect of lignin-modification on the rheological properties of bitumen. In: *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction IV: Contributions to the 4th International Conference on Advances in Materials and Pavement Performance Prediction (AM3P 2025)*, Vienna: Research Unit of Road Engineering, TU Wien; 2025.