Přesnost predikce numerických modelů tuhosti asfaltové směsi s R-materiálem stanovené 4PB-TR zkouškou

Majda Belhaj, MSc.
ČVUT v Praze
Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D.
ČVUT v Praze
Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

prof. Jan Król, Ph.D.
ČVUT v Praze
Fakulta stavební

Technická univerzita Varšava

Dynamický modul pružnosti (|E*|) patří mezi klíčové funkční charakteristiky pro studium vlastností asfaltových směsí a pro simulaci jejich viskoelastického chování za různých zatěžovacích a teplotních podmínek. Pokud se experimentální data využijí v podobě řídicích křivek, představuje dynamický modul formu komplexní deformační charakteristiky, která dokáže přiblížit chování asfaltové vrstvy vozovky při zatížení dopravními prostředky a při změnách teplot, kterým jsou vozovkové vrstvy vystaveny. Laboratorní zkoušky ke stanovení této charakteristiky jsou však časově i finančně náročné, obzvláště pokud bychom chtěli měření provádět při větším počtu teplot s využitím širokých spekter frekvencí, které simulují různé stavy zatížení. Pro odhad hodnoty dynamického modulu proto bylo postupně formulováno několik predikčních modelů. Některé z nich jsou reologické a jiné empiricko-regresní. Tento článek se zaměřuje na analýzu dvou typů predikčních modelů pro stanovení řídicí křivky dynamického modulu asfaltové směsi obsahující různý podíl asfaltového R-materiálu. Byly rovněž provedeny laboratorní experimenty k ověření přesnosti těchto modelů. Výsledky ukazují, že nejlepší přesnost pro tvorbu řídicí křivky má Witczakova sigmoidní funkce. Zobecněný Huet-Sayeghův model (2S2P1D) oproti tomu vykazuje méně přesné předpovědi hlavně v rozsahu nízkých a vysokých frekvencí.
Klíčová slova: asfaltová směs, komplexní dynamický modul, řídicí křivka, predikční model, časově-teplotní superpozice

The dynamic modulus of elasticity (|E|) is one of the key functional characteristics for studying the properties of asphalt mixtures and for simulating their viscoelastic behavior under various loading and temperature conditions. If experimental data are used in the form of control curves, the dynamic modulus represents a form of complex deformation characteristic that can approximate the behavior of the asphalt layer of the road under loading by vehicles and during temperature changes to which the road layers are exposed. However, laboratory tests to determine this characteristic are time-consuming and financially demanding, especially if we want to perform measurements at a broader range of temperatures using wide frequency spectra that simulate different load states. Therefore, several prediction models have been gradually formulated to estimate the value of the dynamic modulus. Some of them are rheological and others are empirical-regressive. This article focuses on the analysis of two types of prediction models for determining the control curve of the dynamic modulus of asphalt mixtures containing different proportions of asphalt R-material. Laboratory experiments were also performed to verify the accuracy of these models. The results show that the Witczak sigmoid function has the best accuracy for creating the control curve. The generalized Huet-Sayegh model (2S2P1D), on the other hand, shows less accurate predictions mainly in the low and high frequency range.*
Keywords: asphalt mixture, complex dynamic modulus, control curve, prediction model, time-temperature superposition

1 ÚVOD

Dynamický modul pružnosti (E*) je základní materiálová charakteristika, která se používá k vymezení tuhosti a pružné odezvy viskoelastických materiálů, jako jsou například asfaltové směsi [1]. Jedná se o zásadní parametr při navrhování a analýze vozovek, protože kvantifikuje schopnost materiálu odolávat deformaci v podmínkách dynamického (cyklického) zatížení, kterému jsou konstrukce vozovek běžně vystaveny v důsledku provozu vozidel a teplotních změn. |E*| se obvykle určuje pomocí laboratorních zkoušek a je definován jako poměr napětí (σ) a deformace (ε), kterým je materiál vystaven v podmínkách sinusového zatížení při různých teplotách [2]. Matematicky je znázorněn v rovnici (1).

Za uvedených podmínek sinusového zatěžování při různých teplotách se asfaltová směs chová převážně lineárně viskoelasticky, takže odezva materiálu na sinusové namáhání má sinusový průběh s fázovým zpožděním (Φ) mezi deformací a napětím. Na základě toho se vypočítá dynamický modul pružnosti (E*), který má reálnou složku (E_1) a imaginární složku (E_2), jak je znázorněno na obr. 2. Poskytuje důležité informace o elastickém a viskózním chování asfaltové směsi v širokém rozsahu teplot a zatěžovacích frekvencí.

Pro výpočet tohoto modulu existují různé zkušební metody, které se liší typem zatížení v závislosti na konkrétním zkušebním protokolu. Zatížení může být aplikováno buď v tlaku (axiální zatížení) v případě dynamické zkoušky opakovaného namáhání v příčném tahu, nebo v ohybu v případě dvoubodových a čtyřbodových zkoušek. V tomto článku je pozornost věnována čtyřbodové zkoušce (podle přílohy B normy EN 12697-26), vypočten je dynamický modul pružnosti a následně vytvořena řídicí křivka. Je však známo, že dynamické zkoušky, včetně čtyřbodové zkoušky ohybem, jsou zdlouhavé

a nákladné. Mnoho odborných týmů proto zkoumalo možnost předpovědi modulu pomocí různých metod s cílem získat řádovou hodnotu, kterou lze použít při návrhu vozovky [3, 4, 5, 6, 7]. Výzkumem bylo zjištěno, že existují tři hlavní metody předpovědi: (1) empirické predikční rovnice (založené na regresních analýzách), (2) mezo-mechanická metoda predikce (založená na teorii kompozitních materiálů) a (3) numerická simulace (založená na počítačové technologii) [8].

V posledních několika letech se výrazně zvýšil výzkum zaměřený na předpověď dynamického modulu pružnosti asfaltových směsí obsahujících R-materiál. Tyto studie využívají různé techniky, jako jsou empirické, mechanistické, založené na strojovém učení a zaměřené na hybridní modely, ke zvýšení přesnosti předpovědi vlastností asfaltových směsí s obsahem R-materiálu. Za všechny jmenujme alespoň několik příkladů. Wu et al. představili [9] mezo-mechanický model n-vrstvých systémů pro předpověď E* asfaltových materiálů s R-materiálem. Pro lepší predikci bylo doporučeno zvážit rozdělení asfaltových vrstev na N = 50 vrstev. Vzhledem k tomu, že rychlost růstu předpovězených E* takových materiálů se výrazně snížila, Hossain a kol. v práci [10] hodnotili viskoelastické vlastnosti asfaltových pojiv s příměsí R-materiálu a studovali použití Witczakova modelu k odhadu dynamických řídicích křivek modulu asfaltových směsí obsahujících R-materiál. Došli k závěru, že Witczakův model je schopen předpovědět řídicí křivky E* tohoto typu směsí. A konečně Dao et al. [11] použili různé algoritmy založené na strojovém učení k předpovědi dynamického modulu přetvárnosti nízkoteplotních asfaltových směsí s různým obsahem R-materiálu, jako je například support vector machine (SVM), umělá neuronová síť (ANN), regrese rozhodovacího stromu (Boosted) a regrese Gaussovým procesem (GPR). Bylo zjištěno, že algoritmus Boosted má ve srovnání s výše uvedenými algoritmy nejlepší simulaci E*.

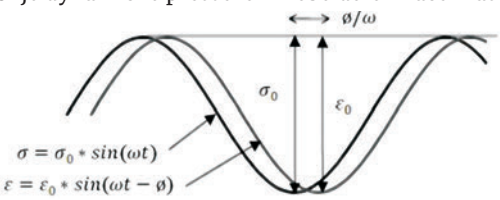
Witczakův statistický model [4] a Hirschův model [12] byly jedny z prvních modelů, které vyhodnocovaly dynamický modul a úhel fázového posunu při určité teplotě a napětí s ohledem na vlastnosti směsi.

Witczakův model 1-37A a Witczakův model 1-40D [4] jsou nejoblíbenějšími modely pro předpověď komplexního modulu přetvárnosti konvenční asfaltové směsi. Tyto dva empirické regresní modely vycházejí ze sigmoidní funkce. Dobrá predikce těchto metod vedla k jejich začlenění do Mechanisticko-empirické příručky pro navrhování vozovek (MEPDG).

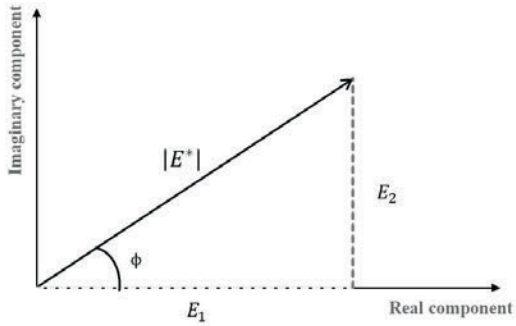
$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1}$$

kde

σ představuje dynamické napětí působící na materiál,
ε je dynamické přetvoření nebo deformace materiálu.



obr. 1 *Sinusový průběh napětí a deformace v čase*



obr. 2 *Grafické znázornění složek dynamického modulu včetně úhlu posunutí Φ*

2. TEORETICKÁ VÝCHODISKA – PREDIKČNÍ MODELY

2.1 Witczakův model: funkce sigmoidy

Výzkum realizovaný na University of Maryland ukázal, že hlavní křivku asfaltové směsi lze reprezentovat sigmoidní funkcí. Metoda, kterou zavedli Pellinen a Witczak, spočívá v konstrukci řídicí křivky úpravou parametrů sigmoidní funkce ve vztahu k měření dynamického modulu stanoveného v laboratoři, a to metodou nelineární regrese.

$$Log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma Log(f_r)}} \tag{2}$$

kde

$|E^*|$ je dynamický modul (MPa),
α, β, γ a δ jsou regresní parametry,
f_r je redukovaná frekvence (Hz) definovaná následujícím vztahem.

$$f_r = a_T \cdot f \Leftrightarrow Log(f_r) = Log(a_T) + (f) \tag{3}$$

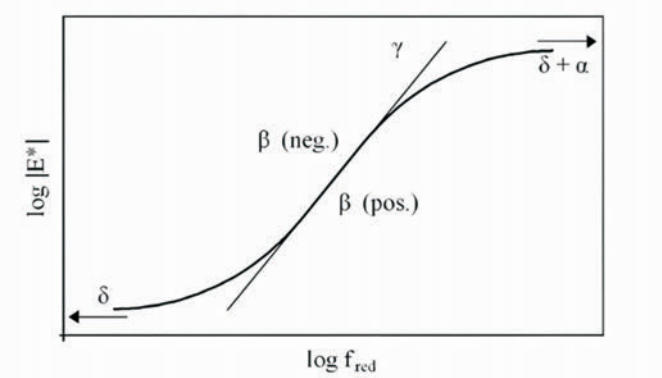
kde

a_T je faktor posunutí,
f je testovaná frekvence při teplotě T (Hz),
T je zkušební teplota (°C).

Tento sigmoidní model se pohybuje mezi $\langle Log(|E^*|)\rangle_{min}$ (δ) a $\langle Log(|E^*|)\rangle_{max}$ ($\delta+\alpha$) v závislosti na dvou tvarových matematických parametrech (β, γ) a redukované frekvenci f_r určené podle principu časově-teplotní superpozice.

V této rovnici parametr γ ovlivňuje sklon funkce (míra změny mezi maximem a minimem) a parametr β ovlivňuje horizontální polohu bodu otáčení (obr. 3). Koeficienty α a δ navíc závisí na zrnitostním složení asfaltové směsi, obsahu asfaltu a mezerovitosti. Koeficienty β a γ závisí na vlastnostech pojiva a velikosti δ a α. Stanovení těchto parametrů se jednoduše provádí pomocí funkce SOLVER v MS Excel. Postup spočívá ve volení proměnlivých hodnot parametrů tak, aby odpovídaly naměřeným údajům.

V literatuře existuje mnoho metod, které pomáhají definovat faktor posunu, jako je Williamsova-Landelova-Ferryho rovnice (WLF), Arrheniova rovnice, zobecněná časově-teplotní superpozice (GTTS), empirické nebo semi-empirické metody. Nejpoužívanější dosud stále ještě je grafické stanovení. V tomto případě se izotermy převádějí horizontálně, dokud se nevejdou

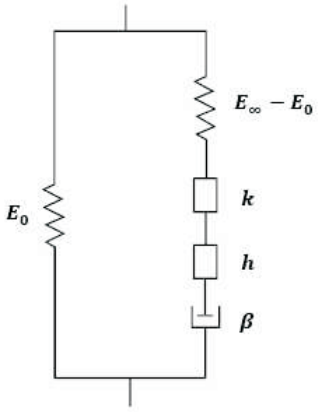


obr. 3 *Parametrizace sigmoidní funkce [18]*

na sousední izotermu ve vztahu ke zvolené referenční teplotě (v této studii je referenční teplota stanovena na 20 °C) a s využitím principu časově-teplotní superpozice.

2.2 Zobecněný Huet-Sayeghův model (2S2P1D)

Model 2S2P1D se skládá ze dvou pružin, dvou parabolických prvků a jednoho tlumiče, odtud také název modelu. Jedná se o úpravu Huet-Sayeghova modelu s dalším lineárním tlumičem zařazeným do série s parabolickými prvky a pružinou tuhosti (obr. 4). Tento model je vhodný pro charakterizaci viskoelastických vlastností asfaltových směsí a asfaltových pojiv, které při dynamickém zatížení vykazují jak pružnou, tak viskózní odezvu [19]. Tento zjednodušený model lze použít pro účely analýzy a návrhu v inženýrství asfaltových směsí k předpovědi chování materiálu za různých zatěžovacích podmínek.



obr. 4 *Zobecněný Huet-Sayegh reologický model (2S2P1D)*

Komplexní modul zobecněného Huet-Sayeghova modelu je dán následujícím výrazem:

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\tau\beta)^{-1}} \quad (4)$$

Model se skládá z devíti parametrů, z nichž šest je explicitně vyjádřeno v předchozí rovnici, a to:

- E_0 je vysokoteplotní tuhost,
- E_∞ je ryze elastický modul,
- α, k, h jsou charakteristiky parabolických prvků a jsou stanoveny jako $0 < k < h < 1$,
- β je newtonovská viskozita tlumiče.

Pokud jde o zbývající tři parametry, jsou určeny implicitně pomocí τ, časové charakteristiky, a vypočítají se následovně:

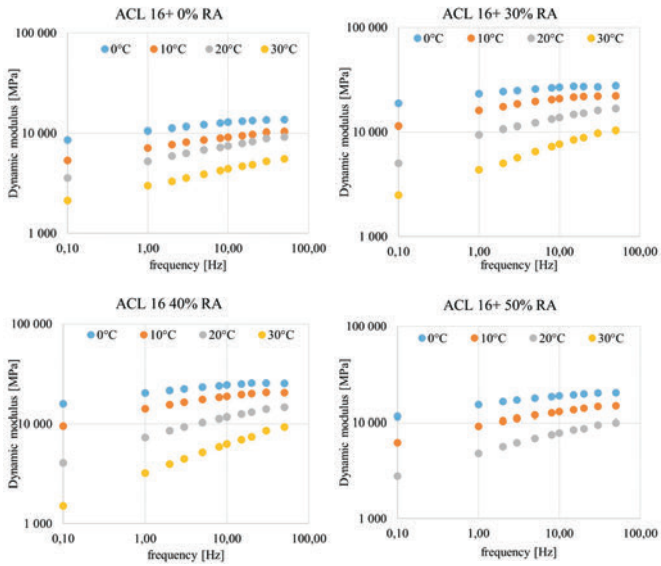
$$Ln(\tau) = a + bT + cT^2 \quad (5)$$

kde a, b, c jsou regresní konstanty reprezentující materiálové charakteristiky.

3 POUŽITÉ MATERIÁLY A LABORATORNÍ POSTUPY

V této studii byla provedena zkouška stanovení dynamického modulu pružnosti čtyř asfaltových směsí s různým obsahem R-materiálu (0 %, 30 %, 40 % a 50 %). Zkušební data byla použita k získání parametrů obou modelů – parametrů Witczakova modelu se sigmoidou a parametrů zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) – a byla použita k dalšímu studiu přesnosti těchto modelů.

Použité asfaltové směsi měly maximální jmenovitou velikost kameniva 16 mm, jak je znázorněno na obr. 5 – jedná se o směs typu ACL 16+ dle ČSN 73 6121. Všechny směsi měly obsah pojiva 4,5 %-hm., který byl součtem čerstvě přidávaného asfaltového pojiva a asfaltu obsaženého v R-materiálu. Přidané asfaltové pojivo je silniční asfalt 50/70, a to v kombinaci s rejuvenátorem použitým pro asfaltové směsi s obsahem R-materiálu > 20 %-hm. Použitý R-materiál byl odebrán ze spolupracující asfaltové obalovny a jeho třídění a požadavky se řídily požadavky dle ČSN EN 13 108-8 a ČSN 73 6141. R-materiál byl ze vstupní znovuzískané asfaltové směsi předrcen, přetříděn a uskladněn v laboratoři ve dvou frakcích: střednězrnná frakce 0/8 mm a hrubozrnná frakce 8/16 mm, přičemž obsah pojiva u jemnozrnné frakce 0/8 mm byl v rozmezí 5,0-5,6 %-hm. U hrubozrnné frakce se pohyboval na úrovni 3,9 %-hm. Penetrace asfaltového pojiva v R-materiálu se pohybuje v rozmezí 16-24 dmm a bod měknutí v intervalu 65-72 °C.



obr. 5 *Izotermické křivky asfaltových směsí s (a) 0 % R-materiálu, (b) 30 % R-materiálu, (c) 40 % R-materiálu, (d) 50 % R-materiálu*

Ke zhutnění zkušebního tělesa tvaru desky s rozměry 405 mm × 300 mm × 50 mm byl použit ocelový segmentový válec podle ČSN EN 12697-33. Deska byla následně rozřezána na 5 trámců s rozměry 405 mm × 50 mm × 50 mm.

Zkouška dynamického modulu pružnosti byla provedena podle ČSN EN 12697-26 při čtyřech teplotách: 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C a při jedenácti vybraných frekvencích: 50 Hz, 30 Hz, 20 Hz, 15 Hz, 10 Hz, 8 Hz, 5 Hz, 3 Hz, 2 Hz, 1 Hz a 0,1 Hz pro každou tep-

lotu s použitím univerzálního testeru. Během této zkoušky je vzorek asfaltové směsi upevněn ve dvou koncových bodech a na dva středové body je aplikováno sinusové zatížení.

3.1 Výsledky experimentů – stanovení řídicí křivky

Z experimentálních dat (E_1 a E_2) se vypočítá dynamický modul pružnosti (E*) každé asfaltové směsi a poté se vynese do grafu jako izoterma pro každou teplotu T. Na obr. 6 jsou vyneseny izotermické křivky pro všechny testované směsi. U směsi s 50 % RA chybí izotermická křivka při 30 °C z důvodu nelogičnosti získaných hodnot měření při této teplotě, a to při porovnání se zbývajícími teplotami zkoušky.

Pomocí principu časově-teplotní superpozice byly izotermické křivky posunuty do jedné hladké křivky, tzv. řídicí křivky. To umožňuje lepší analýzu chování asfaltových směsí v rozsahu mezních podmínek. Poskytuje také vztah mezi dynamickým modulem a redukovanou frekvencí v logaritmickém měřítku. Redukovaná frekvence (ω_r) se vypočítá jako:

$$\omega_r = \omega \cdot 10^{\log a(T)} \tag{6}$$

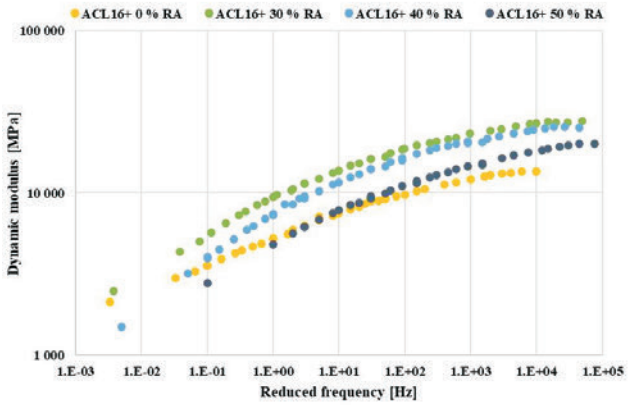
kde

ω_r je redukovaná frekvence při definované teplotě (Hz),
ω je frekvence (Hz),
$\log a(T)$ je faktor posunu,
T je teplota (°K).

Faktor posunu je definován jako velikost posunu potřebná k tomu, aby se izotermická křivka při každé teplotě posunula podle definované teploty nazývané referenční teplota T_R. V tomto článku je T_R = 20 °C [20]. Tyto posuny jsou provedeny ručně prostřednictvím programu MS Excel, jak je uvedeno v tab. 1 a následně jsou vyneseny hlavní křivky (obr. 6).

tab. 1 *Stanovení faktoru posunu pro asfaltové směsi s rozdílným podílem R-materiálu*

R materiál (%)	0 °C		10 °C		20 °C		30 °C	
	a(T)	log(a(T))	a(T)	log(a(T))	a(T)	log(a(T))	a(T)	log(a(T))
0	200	2,301	5	0,699	1	0	0,033	1,481
30	980	2,991	30	1,477	1	0	0,038	1,420
40	900	2,954	30	1,477	1	0	0,05	1,301
50	1500	3,176	30	1,477	1	0		



obr. 6 *Řídicí křivky asfaltové směsi s 0 %, 30 %, 40 % a 50 % R-materiálu*

4 ZÍSKÁVÁNÍ PARAMETRŮ

4.1 Časově-teplotní superpozice

V modelech dynamické predikce modulů se k interpretaci vlivu teploty na vlastnosti materiálu a k predikci jejich chování při různých rychlostech zatížení používá koncept „časově-teplotní superpozice“ (TTS). Tento koncept je důležitý pro asfaltové směsi, protože vykazují významné viskoelastické chování a jsou teplotně významně citlivé. TTS (τ) je časová stupnice, která se používá k posunům izotermických křivek, jak byly uvedeny v přechozí části, a k vytvoření řídicí křivky. Vypočítá se následovně

$$Ln(\tau) = a + bT + cT^2 \tag{7}$$

kde a,b,c jsou regresní konstanty reprezentující materiálové charakteristiky.

tab. 2 *Regresní konstanty reprezentující materiálové charakteristiky (polynom 2. stupně).*

R materiál (%)	Regresní parametry			
	a	b	c	R^2
0	2,217	0,130	0,000301	0,98
30	2,992	0,154	0,000235	1,00
40	2,963	0,156	0,000440	1,00
50	3,176	0,181	0,001109	1,00

V tab. 2 jsou shrnuty výsledné regresní konstanty pro testované asfaltové směsi. Ukazuje se, že hodnoty „a“ a „b“ jsou si pro různé typy téhož typu směsi s různým podílem R-materiálu blízké, ale parametr „c“ se liší.

4.2 Witczakův model sigmoidní funkce

Pro vykreslení řídicí křivky směsí byly regresní koeficienty α, β, γ a δ sigmoidní funkce stanoveny metodou nelineární regrese pomocí funkce SOLVER v programu MS Excel. Tyto regresní koeficienty byly stanoveny a uvedeny v tab. 3 pro každou zkoušenou asfaltovou směs při stejné referenční teplotě T_R = 20 °C.

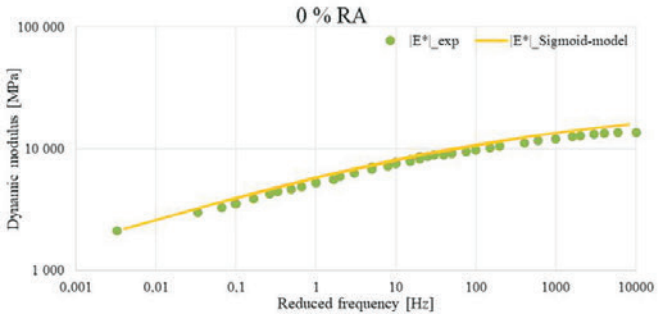
tab. 3 *Regresní parametry sigmoidní funkce*

R materiál (%)	Regresní parametry			
	δ	α	β	γ
0	2,373	2,032	0,775	0,361
30	2,447	2,087	0,996	0,451
40	0,004	4,451	1,862	0,473
50	1,353	3,149	1,055	0,373

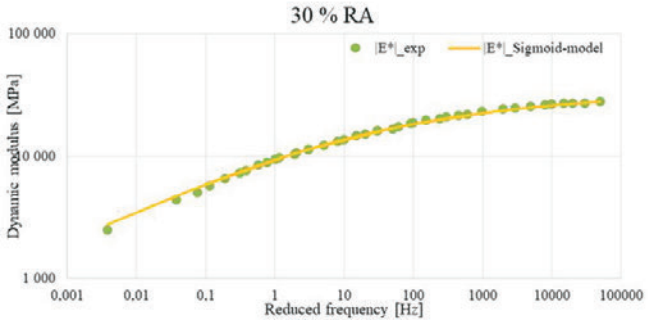
Tyto koeficienty jsou si velmi blízké pro asfaltové směsi s 0 % a 30 % R-materiálu, ale liší se od ostatních. Rozdíl mezi těmito parametry může být způsoben tím, že přídavek 30 % R-materiálu a méně má významně menší vliv na mechanické vlastnosti asfaltových směsí ve srovnání se směsmi s vyšším obsahem regenerovaného asfaltu.

Řídicí křivky |E*| pro různé testované asfaltové směsi jsou uvedeny v závislosti na redukované frekvenci pro referenční teplo-

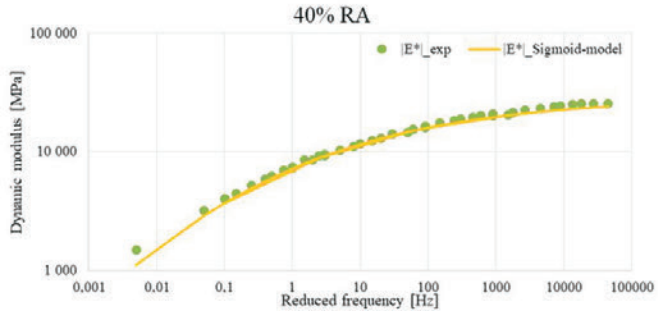
tu 20 °C na obr. 7-10. Vyhodnocení řídicích křivek ukázalo, že dynamický modul odhadnutý sigmoidní funkcí se téměř shoduje se skutečným měřením dynamického modulu stanoveného v laboratoři. Nejhorší shoda byla dosažena u směsi s 0 % R-materiálu, kde sigmoidní model vykazoval nadhodnocený odhad hodnot dynamického modulu v celém rozsahu frekvencí, tedy i teplot.



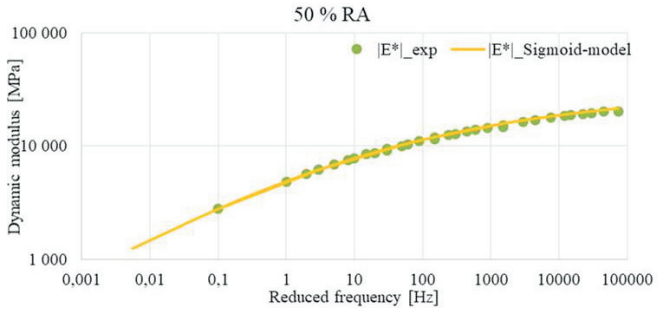
obr. 7 *Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 0 % R-materiálu při T_R = 20 °C*



obr. 8 *Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 30 % R-materiálu při T_R = 20 °C*

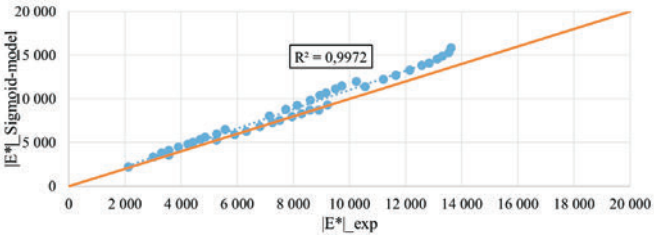


obr. 9 *Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 40 % R-materiálu při T_R = 20 °C*

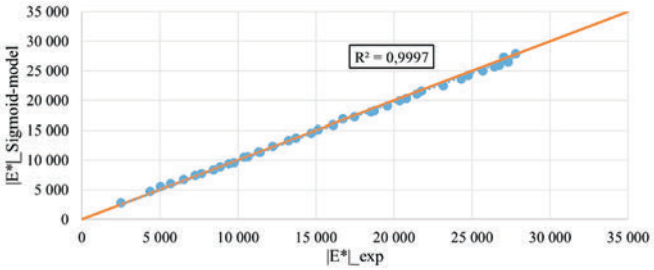


obr. 10 *Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 50 % R-materiálu při T_R = 20 °C*

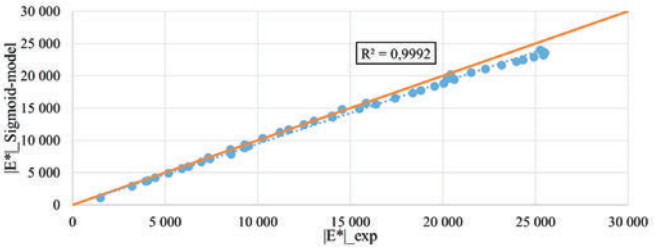
Obr. 11-14 shrnují vypočtenou hodnotu |E*| jako funkci naměřené hodnoty |E*| všech testovaných asfaltových směsí. Obrázky ukazují dobrou přesnost a korelaci mezi naměřeným a vypočteným dynamickým modulem pro všechny testované směsi s výjimkou asfaltové směsi bez R-materiálu. Přesto se koeficient determinace R^2 u všech směsí pohybuje kolem 0,99. U všech asfaltových směsí je vidět, že všechny body leží téměř na přímce, kde y = x.



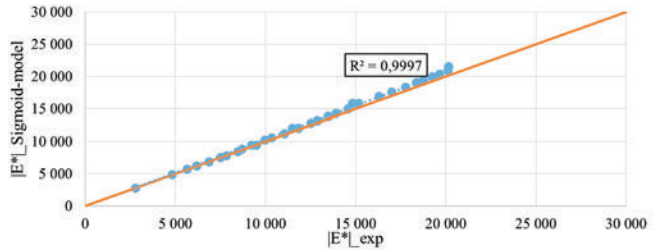
obr. 11 *Porovnání naměřených hodnot |E*| exp a vypočtených hodnot |E*| sigmoid-model pro asfaltovou směs s 0 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*



obr. 12 *Porovnání naměřených hodnot |E*| exp a vypočtených hodnot |E*| sigmoid-model pro asfaltovou směs s 30 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*



obr. 13 *Porovnání naměřených hodnot |E*| exp a vypočtených hodnot |E*| sigmoid-model pro asfaltovou směs s 40 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*



obr. 14 *Porovnání naměřených hodnot |E*| exp a vypočtených hodnot |E*| sigmoid-model pro asfaltovou směs s 50 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*

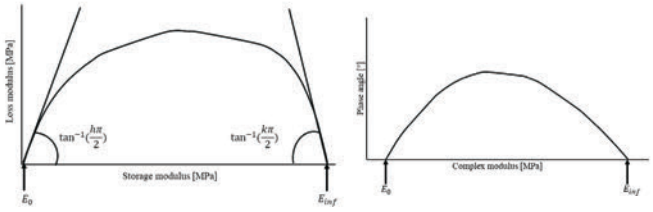
4.3 Zobecněný Huet-Sayeghův model (2S2P1D)

V případě druhého použitého modelu byly opět za účelem vykreslení řídicí křivky směsí stanoveny regresní koeficienty α, β, k a h modelu 2S2P1D. Tyto koeficienty jsou shrnuty v tab. 4 pro každou zkoušenou asfaltovou směs při stejné referenční teplotě T_R = 20 °C.

tab. 4 *Parametry zobecněného Huet-Sayeghova modelu*

R materiál (%)	Parametry zobecněného Huet Sayegh modelu					
	E_0	E_∞	k	h	α	β
0	760	13 966	0,157	0,539	1,469	2259955
30	1 154	27 717	0,215	0,749	2,728	2259953
40	214	26 105	0,242	0,725	3,559	2259961
50	16	23 935	0,195	0,670	4,644	2259953

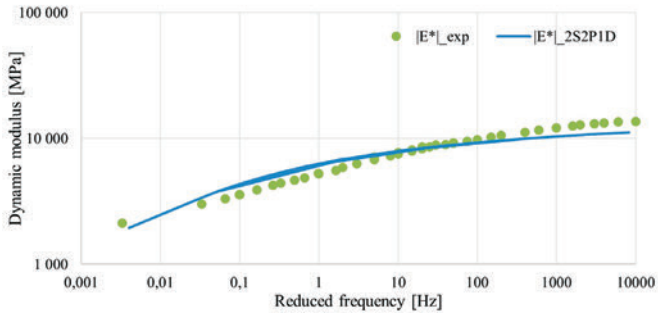
Parametr k ovlivňuje levou asymetrii Cole-Cole diagramu a vertikální umístění Black diagramu, parametr h ovlivňuje poloměr křivek Black diagramu a Cole-Cole křivky, parametr α ovlivňuje výšku Cole-Cole křivky a pravou asymetrii Black diagramu a parametr β obvykle představuje rozložení relaxačních časů v materiálu a používá se k popisu celkového tvaru relaxačního spektra.



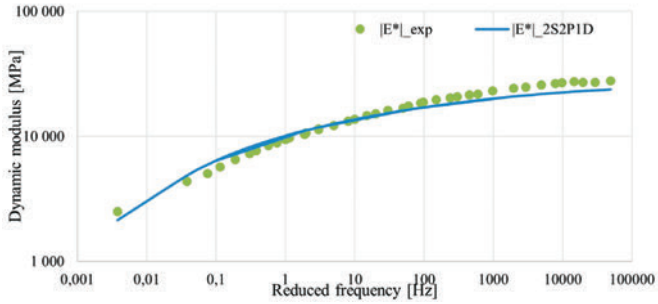
obr. 15 *Grafické znázornění parametrů Huet-Sayeghova modelu v Cole-Cole diagramu (vlevo) a v Black diagramu (vpravo) [21]*

Kromě toho Cole-Cole diagram a Black diagram pomáhají při získávání mezních hodnot dynamického modulu, tj. hodnot E_0 a E_∞ Black diagramu, které jsou výsledkem vynesení dynamického modulu |E*| v závislosti na fázovém úhlu Φ (obr. 15 vpravo), zatímco Cole-Cole diagram (obr. 15 vlevo) je znázorněním modulu E_1 a ztrátového modulu E_2. Tyto dva diagramy jsou považovány za cenné nástroje, protože hodnotí materiály nezávisle na principu časově-teplotní superpozice.

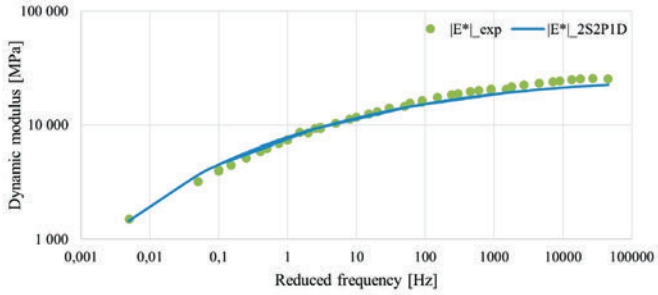
Je zřejmé, že všechny testované asfaltové směsi mají téměř stejnou hodnotu parametru β. Je také patrné, že parametry modelu pro směsi s 30 % a 40 % R-materiálu jsou si blízké. To může být způsobeno mírným rozdílem v obsahu R-materiálu ve srovnání s ostatními posuzovanými směsmi. Na obr. 16-19 jsou uvedeny řídicí křivky |E*| pro testované asfaltové směsi v závislosti na frekvenci pro referenční teplotu 20 °C. Jejich vyhodnocení ukázalo, že dynamický modul predikovaný zobecněným Huet-Sayeghovým modelem se liší od skutečného měření dynamického modulu v laboratoři zejména v rozsahu nízkých a vysokých frekvencí. Tyto rozdíly jsou u jednotlivých směsí odlišné. Z toho vyplývá, že model 2S2P1D nesimuluje správně lineární viskoelastické chování asfaltových směsí v daném rozsahu frekvencí a je nutná jeho úprava.



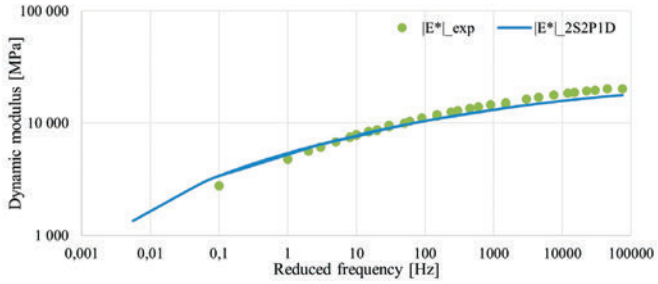
obr. 16 *Porovnání řídicích křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 0 % R-materiálu při T_R = 20 °C*



obr. 17 *Porovnání řídicích křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 30 % R-materiálu při T_R = 20 °C*

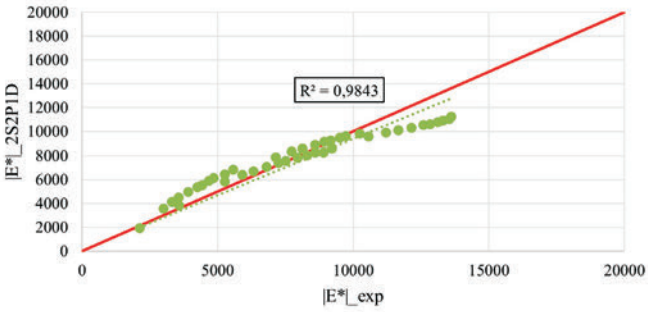


obr. 18 *Porovnání řídicích křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 40 % R-materiálu při T_R = 20 °C*

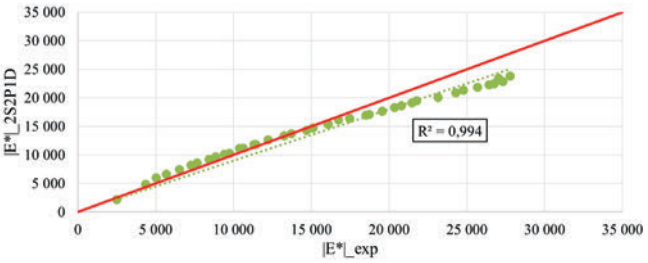


obr. 19 *Porovnání řídicích křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 50 % R-materiálu při T_R = 20 °C*

Obr. 20-23 ukazují vypočtenou hodnotu |E*| jako funkci naměřené hodnoty |E*| pro všechny testované asfaltové směsi. Patrná je dobrá přesnost a korelace mezi experimentálními komplexními moduly a moduly odhadnutými zobecněným Huet-Sayeghovým modelem v rozsahu nízkých frekvencí.

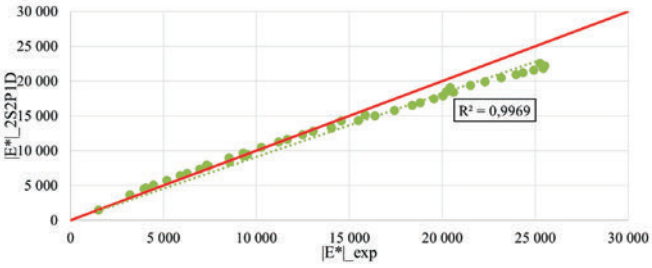


obr. 20 Porovnání naměřených hodnot |E| exp a vypočteného modelu |E*| 2S2P1D pro asfaltovou směs s 0 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*

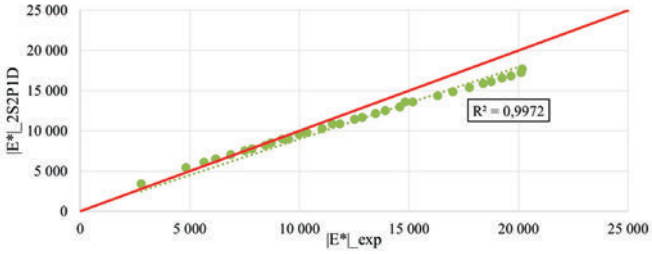


obr. 21 Porovnání naměřených hodnot |E| exp a vypočteného modelu |E*| 2S2P1D pro asfaltovou směs s 30 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*

V rozsahu vysokých frekvencí jsou údaje pod přímkou funkce identity. Rozdíl však není příliš velký.



obr. 22 Porovnání naměřených hodnot |E| exp a vypočteného modelu |E*| 2S2P1D pro asfaltovou směs s 40 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*



obr. 23 Porovnání naměřených hodnot |E| exp a vypočteného modelu |E*| 2S2P1D pro asfaltovou směs s 50 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity y = x)*

Všechna testovaná data dosáhla hodnot $R^2 \approx 1$ a téměř dokonalého vyrovnání podél přímky s nejlepší shodou.

6 ZÁVĚR

Tato studie se zaměřila na analýzu přesnosti dvou různých typů modelů predikce modulu tuhosti asfaltové směsi - sigmoidní funkce využitá Witczakovým modelem a zobecněný Huet-Sayeghův model známý také jako model 2S2P1D. Tyto modely byly aplikovány na 4 asfaltové směsi se stejným typem kameniva se 4 různými obsahy R-materiálu (0 % RA, 30 % RA, 40 % RA a 50 % RA) o stejné zrnitosti a obsahu pojiva.

Ukázalo se, že funkce sigmoidy nejlépe charakterizuje řídicí křivku za horka prováděných asfaltových směsí s R-materiálem. Přizpůsobení závislosti naměřeného modulu na vypočteném modulu posouzené funkcí identity tento závěr potvrdilo.

Na druhé straně model 2S2P1D vykázal méně přesnou předpověď dynamické řídicí křivky, zejména v oboru nízkých a vysokých frekvencí. V těchto rozsazích má model tendenci podhodnocovat komplexní modul asfaltové směsi s R-materiálem. Přesto bylo celkové přizpůsobení poměrně dobré. Nicméně je třeba je dále analyzovat s využitím větších souborů různých směsí a pokusit se je upravit.

Poděkování: Tento výsledek vznikl v rámci aktivit souvisejících s projektem GA22-04047K financovaným GAČR a projektem 2021/03/Y/ST8/00079 Narodoweho Centra Nauki National (Polsko) v rámci výzvy Weave-UNISONO 2021.

ZDROJE

[1] T. K. Pellinen, "Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot mix asphalt," Tempe, Arizona, USA, 2001.
[2] M. W. Witzcak, Simple performance test for superpave mix design, vol. 465, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2002.
[3] J. Bari, Development of a new revised version of the Witczak E* predictive models for hot mix asphalt mixtures., Arizona: Ph.D. dissertation, Arizona State University, 2005.
[4] G. Al-Khateeb, A. Shenoy, N. Gibson and T. Harman, "A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures," Assoc. Asph. Paving Technol., vol. 75, 2006.
[5] M. S. Sakhaei Far, "Development of New Dynamic Modulus (E*) Predictive Models for Hot Mix Asphalt Mixtures," North Carolina State University ProQuest Dissertations Publishing, North Carolina, 2011.
[6] C. W. Schwartz, "Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model," in Proceedings of the 84th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.
[7] H. Ceylan, C. W. Schwartz, S. Kim and K. Gopalakrishnan, "Accuracy of predictive models for dynamic modulus of hot-mix asphalt," J. Mater. Civ. Eng., vol. 21, no. 6, pp. 286-293, 2009.
[8] G. Garcia and M. Thompson, "HMA dynamic modulus predictive models (a review)," FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation, 2007.
[9] C. Tóth and J. Ureczky, "Determination of master curves for asphalt mixtures by means of IT-CY tests," Period. Polytech., p. 137–142, 2010.
[10] H. D. Benedetto, "Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model," Constr Build Mater., vol. 38, pp. 395-406, 2013.
[11] W. S. M. a. R. B. A. Booshehrian, "How to Construct an Asphalt Binder Master Curve and Assess the Degree of Blending between RAP and Virgin Binders," J. Mater. Civ. Eng., vol. 25, no. 12, pp. 1813-1821, 2013.

[12] Y. E. Adams, M. Zeghal and H. M. El Hussein, "complex modulus test protocol and procedure for determining Huet-Sayegh model parameterS," NRC-CNRC, 2006.

Lektorský komentář

Moduly tuhosti stanovené při různých zkušebních teplotách a zatěžovacích frekvencích patří mezi hlavní funkční charakteristiky asfaltových směsí. Jsou využívány pro vzájemné hodnocení směsí a při návrhu a posuzování konstrukcí vozovek. Stanovování modulů tuhosti u asfaltových směsí v široké škále zkušebních teplot a frekvencí je v silniční laboratoři časově i finančně náročným procesem. Z tohoto důvodu se v poslední době objevují různé predikční modely, které se snaží tuto základní materiálovou charakteristiku odhadovat. V článku je provedeno porovnání přesnosti dvou predikčních modelů - Witczakova modelu a zobecněného Huet-Sayeghova modelu. Oba modely byly aplikovány na celkem 4 asfaltové směsi typu ACL 16+ s různými obsahy R-materiálu. Witczakův model při tomto srovnání vykázal vyšší přesnost. Vzhledem ke skutečnosti, že se silniční laboratoře v poslední době začínají stále více vybavovat moderními zkušebními zařízeními si však osobně myslím, že bychom se v budoucnu měli ubírat spíše cestou přesnějšího a rychlejšího laboratorního stanovování funkčních parametrů asfaltových směsí, než cestou jejich odhadování pomocí různých modelů.

Doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební