



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# SIMULACE NELINEÁRNÍ ODEZVY STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ A PROBLÉM IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ

SIMULATION OF NONLINEAR RESPONSE OF BUILDING MATERIALS AND PROBLEM  
OF IDENTIFICATION OF MATERIAL PARAMETERS

## DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Filip Hokeš

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JIŘÍ KALA, Ph.D.

BRNO 2022

## KLÍČOVÁ SLOVA

optimalizace, identifikace parametrů, materiálová nelinearita, beton, plasticita, reologie

## KEYWORDS

optimization, parameter identification, material nonlinearity, concrete, plasticity, rheology

© Ing. Filip Hokeš  
Ústav stavební mechaniky  
Fakulta stavební  
Vysoké učení technické v Brně  
Česká republika

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Filip Hokeš *Simulace nelineární odezvy stavebních materiálů a problém identifikace materiálových parametrů*. Brno, 2022. 111 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>TEORIE KOMPLEXNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ</b>	<b>5</b>
4.1	MATERIÁLOVÝ MODEL <i>MENETREY-WILLAM</i> . . . . .	7
4.2	KELVINŮV ŘETĚZEC . . . . .	9
<b>5</b>	<b>TEORIE OPTIMALIZACE</b>	<b>10</b>
5.1	OPTIMALIZAČNÍ METODY . . . . .	12
5.1.1	Klasické metody . . . . .	12
5.1.2	Metody matematického programování . . . . .	12
5.1.3	Moderní metody . . . . .	13
5.2	TESTY IMPLEMENTOVANÝCH ALGORITMŮ . . . . .	15
5.2.1	Funkce Ackley (2D) . . . . .	15
5.2.2	Funkce Gomez-Levy (2D) . . . . .	16
<b>6</b>	<b>APLIKACE OPTIMALIZACE NA PROBLÉMY MECHANIKY STA- VEBNÍCH KONSTRUKCÍ</b>	<b>18</b>
6.1	IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MATERIÁLOVÝCH MODELŮ . . . . .	19
6.1.1	Identifikace na modelu <i>Menetrey-Willam</i> použitím MOGA .	19
6.1.2	Identifikace na modelu <i>Menetrey-Willam</i> použitím PSOA . .	25
6.1.3	Identifikace parametrů <i>Kelvinova řetězce</i> . . . . .	30
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>33</b>
	<b>LITERAURA</b>	<b>34</b>
	<b>PŘEHLED PUBLIKAČNÍCH AKTIVIT</b>	<b>38</b>
	<b>CURRICULUM VITAE</b>	<b>42</b>
	<b>ABSTRAKT</b>	<b>47</b>



# 1 ÚVOD

Pro podrobnou analýzu odezvy stavebních konstrukcí se využívají numerické modely, které mohou být velmi komplexní a v konečném důsledku obsahovat řadu vstupních parametrů. Zdaleka ne všechny parametry lze určit přímo s pomocí dostupných experimentů. Problematiku identifikace lze tedy považovat za nedílnou součást pokročilých numerických analýz, nicméně aplikace metod identifikace je spíše doménou vědeckých studií. Obsahem předkládané práce je proto představení implementace metody identifikace parametrů nelineárních materiálových modelů pomocí optimalizace do výpočetního nástroje dostupného v projekční praxi.

Za dominantní lze v oblasti statiky a dynamiky stavebních konstrukcí považovat numerické řešení metodou konečných prvků (FEM) [4, 56], přestože některé programy poskytují pro materiálově a geometricky lineární prutové úlohy řešení ryze analytické, při výpočtech rozsáhlých konstrukcí s plošnými či objemovými prvky je však použití FEM nevyhnutelné. Stejný závěr lze učinit v případě, že se vliv geometrické nebo materiálové nelinearity do úvahy vezme. Všeobecnou snahou je navrhovat nosné konstrukce staveb úsporné, avšak bezpečné a dlouhodobě provozuschopné. Uvedené aspekty pak akcentují potřebu využití geometricky nelineárního řešení u lanových a membránových konstrukcí či materiálově nelineárního řešení betonových konstrukcí, které vykazují vazké (zpožděné) chování.

Zahrnutí nelinearity, které jsou normativními standardy povoleny, klade aditivní požadavky nejen na vývojáře a výstupní kvalitu software, ale zároveň na jejich uživatele. Ve výpočtových systémech *Dlubal RFEM* a *SCIA Engineer* je v oblasti nastavování nelineárního řešení snaha uživateli ulehčit. Oblast, kde však nejsou na první pohled přílišná zjednodušení možná, je zadávání vstupních vlastností použitých materiálů.

V metodě konečných prvků se vliv vlastností materiálu na statickou odezvu zavádí prostřednictvím fyzikálních rovnic, které mohou mít pro lepší výstižnost reálného chování nelineární tvar. Takový matematický model označovaný také jako materiálový model může vycházet z různých teoretických východisek, což má přímý vliv na podobu vstupních charakteristik. Nejčastěji se jedná o mechanicko-fyzikální a lomově-mechanické vlastnosti. Vedle těchto známých veličin to však mohou být i další koeficienty jako jsou např. tuhosti a viskozity elementárních členů reologických řetězců nebo např. tzv. *Dynamic Increase Factor* (DIF) [76]. Uvedené parametry je nutné zadat před spuštěním vlastní numerické simulace. Typicky se s tímto obecným zadáním lze setkat při využití knihovny nelineárních materiálových modelů *multiPlas* [13], která vznikla pro podporu simulací v systému *ANSYS*. Ve speci-

alizovaných statických programech je situace trochu odlišná, jelikož jsou vybaveny databázemi materiálů dle dostupných norem. Tím je zadání zjednodušeno, nicméně v případě komplexních materiálových modelů, které v některých případech mohou kombinovat i více teoretických předpokladů, nejsou některé materiálové parametry v těchto databázích dostupné. Jedním z východisek, jak problém odstranit, je využití 1D pracovních diagramů z experimentů a to přímo jako vstup materiálového modelu, popřípadě z nich lze hodnoty parametrů získávat procesem zpětné *identifikace*. Podstata takového procesu spočívá v nalezení hodnot souboru vstupních parametrů materiálového modelu, který při numerické FEM simulaci dává pracovní diagram odpovídající výstupu z experimentu.

Z materiálů používaných pro návrh nosných konstrukcí staveb se popsáný problém hledání vhodných parametrů materiálových modelů akcentuje u betonu, jelikož vykazuje odlišné chování v tahu a tlaku. Navíc reaguje odlišně na zatížení ve velmi krátkém časovém horizontu a v dlouhodobém měřítku. S ohledem na uvedené skutečnosti bylo tématem práce nasazení metody zpětné identifikace parametrů pomocí optimalizačních algoritmů na elastoplastický materiálový model betonu. Hlavním cílem práce bylo implementovat vhodnou optimalizační metodu pro identifikaci parametrů reologického modelu betonu v systému *RFEM*, která by vycházela jen z uživatelem zadaných křivek dotvarování a v přiměřeném čase poskytovala dostatečně přesné řešení.

Text práce je členěn do 9 kapitol včetně úvodu a závěru. Nejprve je provedena analýza současného stavu problematiky v oblasti identifikace parametrů. Poté následuje představení cílů a obecný teoretický výklad k materiálové nelinearitě včetně popisu použitých materiálových modelů. Další část práce obsahuje teorii optimalizace a kapitolu věnovanou benchmarkům implementovaných algoritmů. Poté je zařazena kapitola, která obsahuje ukázkou rozměrové a tvarové optimalizace. Následující část práce je věnována cílům práce: aplikaci optimalizace na problém identifikace materiálového modelu v systému *ANSYS*, kdy je nejprve představeno řešení s pomocí algoritmů dostupných přímo v tomto software a poté je prokázáno úspěšné použití vlastního implementovaného algoritmu. Poslední část kapitoly obsahuje popis plnění hlavního cíle a nasazení naprogramovaného řešení na identifikaci parametrů *Kelvinova* reologického schématu v programu *RFEM*.

## 2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Určování hodnot parametrů materiálových modelů vyjadřujících vztah mezi napětími a přetvořeními může při být numerickém řešení náročné, zvláště v případě,

když počet takových parametrů řídicích konstitutivní rovnice je výrazně více, což jak uvádí MARKIEWICZ a LANGRAND, přirozeně platí pro anizotropní materiály [49] nebo silně nelineární modely a jejich kombinace implementované TRCALOU a kol. [76]. Problematiku odhadu nebo-li identifikaci parametrů lze tedy považovat za důležitý krok ve vývoji přesných modelů v řadě vědeckých disciplín [63] a při numerickém řešení statických [17, 35, 44, 49, 73] i dynamických problémů [40, 41] stavebních konstrukcí. Jako hlavní používané přístupy v problematice hledání neznámých parametrů numerických modelů lze považovat metody založené na využití umělých neuronových sítí (ANN) a optimalizace.

Proces inverzní identifikace využívající vycvičené umělé neuronové sítě pro identifikaci parametrů modelů konstrukčních materiálů byly publikovány FAIRBARNEM a kol. [15], YOSHIMUROU a kol. [80] či NOVÁKEM a LEHKÝM [58, 43, 45]. Podstata metody spočívá v předložení učící množiny charakterizované souborem dvojic vstup-výstup neuronové sítě. Proces učení se definuje jako optimalizační úloha, jejíž návrhové parametry jsou synaptické váhy a prahy [45]. Využití optimalizačních technik v procesu učení neuronových sítí je v podstatě příkladem nasazení optimalizace na problém identifikace, kdy jsou odhadovány předem neznáme charakteristiky sítě. Optimalizaci lze však pro identifikaci parametrů matematických modelů popisujících odezvu konstrukcí použít i přímo.

V takovém případě se úloha definuje jako minimalizace diskrepance mezi experimentálními daty a výstupem numerické simulace. Vzorová data mohou mít podobu pracovních diagramů, ale mohou být, jak uvádí MARKIEWICZ a LANGRAND [49], reprezentována množinou datových bodů obsahujících informaci o posunech či přetvořeních konstrukce ve skutečném měřítku. Identifikace pomocí optimalizace spočívá v iterativním určování realizací návrhových vektorů obsahujících hodnoty vstupních charakteristik pro numerický výpočet, z něhož se exportuje pracovní diagram v požadovaném tvaru pro výpočet fitness funkce vyjadřující míru similarity se vzorem. Nejčastěji používaným číselným ohodnocením podobnosti je dle MAHNKENA a STEINA [48] suma kvadrátů rozdílů mezi vzorem a realizací, ale lze použít také RMSE chyby [33]. Popsaná aplikace byla rozpracována už v pracích DISTEFANA [12] a PISTERA [59], v nichž byl problém identifikace parametrů reologických modelů formulován jako nelineární optimalizační úloha. Hledání hodnot koeficientů *Kelvinova* řetězce, umožňujícího aproximaci viskózní odezvy v podobě dotvarování, bylo popsáno také v příspěvku GAVRUSE a kol. [18]. Inverzní analýze lomově-mechanických parametrů modelu betonu se v publikaci [60] věnovali PLANAS a kol. Určování parametrů elastoplastických modelů betonu s využitím optimalizace pro statické výpočty z 1D pracovních diagramů byla publikována v několika

odborných publikacích autorem *a kol.* [23, 28, 30, 29, 31] a identifikace parametrů materiálových modelů betonu z experimentálních dat pro řešení dynamické odezvy byla zase publikována KRÁLEM *a kol.* [40, 41]. Aktuální aplikace optimalizace pro identifikaci parametrů modelu kombinujícího viskoplasticitu s poškozením pro modelování cyklické únosnosti oceli za zvýšené teploty byla publikována KYAWEM *a kol.* [42]. Významnou aplikační oblastí je také geotechnika, v níž se shodně využívají komplexní konstitutivní modely pro simulace chování zemin a skalních masivů [35, 50].

Napříč uvedenými aplikacemi se objevují metody, které lze dle [48] dělit na metody 0. řádu (bez využití derivací) a 1. řádu (s využitím derivací). Metody v rámci druhé skupiny se vyznačují relativně vysokou konvergencí, která je však na úkor robustnosti, kdy hrozí uvíznutí v lokálnímu minimu. Optimalizační metody v prvně zmiňované skupině, kam lze například zařadit simplexové algoritmy jsou, jak uvádí [73], konvergenčně pomalejší. S obdobným problémem vyváženým však vyšší robustností se lze setkat u moderních meta-heuristických algoritmů. Jedněmi z nejpopulárnějších takových algoritmů pro identifikaci jsou evoluční a genetické metody. Použití těchto optimalizačních postupů založených na znalostech evoluce a genetiky pro identifikaci parametrů byly publikovány BRAASCHEM a ESTRINEM [6] či TALAREM *a kol.* [74], GAWADEM a SZELIGOU [73] při řešení problémů tváření materiálů a dále například v geotechnických úlohách [34, 35]. Vysoké popularitě a použití se z množiny moderních optimalizačních těší algoritmus *Particle Swarm* (PSO, optimalizace hejnem částic).

Předlohou tohoto algoritmu je chování společenstev živočichů při hledání potravy a byl představen KENNEDYEM a EBERHARTEM [14, 37]. Z hlediska aplikace PSO na problematiku identifikace parametrů, lze uvést příklady z oblasti geotechniky publikované MEIEREM *a kol.* [50] nebo FENGEM *a kol.* [16]. S ohledem na zmíněné úspěšné aplikace algoritmu PSO, a to nejen na problematiku inverzní identifikace materiálových parametrů, byla v rámci dizertační práce jako její hlavní cíl provedena implementace tohoto algoritmu pro účely identifikace parametrů *Kelvinova řetězce* ze zadané křivky dotvarování. Tato aplikace představuje moderní přístup k problematice řešené DISTEFANEM [12], PISTEREM [59] nebo MOLLEM *a kol.* [54] za využití výkonu běžného počítače při zachování uživatelsky jednoduchého vstupu: křivky dotvarování.



### 3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Tématem dizertační práce byla pokročilá numerická analýza konstrukcí s použitím nelineárních materiálových modelů. Ze spektra materiálů používaných pro nosné konstrukce staveb byla pozornost zúžena na beton, který v extrémních případech namáhání vykazuje silně nelineární chování s kvazikřehkou odezvou. Numerická simulace odezvy konstrukcí z betonu je však často komplikována množstvím vstupních neznámých daných komplexností konstitutivních vztahů.

**Prvotním cílem** práce bylo prozkoumat možnosti zpětné identifikace materiálových parametrů vybraných modelů betonu z dostupných experimentálních dat. Pro provedení příslušných identifikačních analýz bylo využito genetického algoritmu MOGA implementovaného přímo v systému ANSYS, ve kterém byly zároveň realizovány vlastní nelineární numerické výpočty. Teoretické aspekty použitého materiálového modelů jsou přehledně zpracovány sekci 4.1. Součástí kapitoly 6.1.1 věnované identifikaci jsou zahrnuty výsledky a závěry citlivostních analýz a dílčích studií zaměřených na volbu korektní účelové funkce, která má často kruciální vliv na úspěšnost provedené optimalizace.

**Hlavním cílem** práce bylo provedení vlastní implementace optimalizačního algoritmu *Particle Swarm*<sup>1</sup> za účelem identifikace parametrů *Kelvinova řetězce* v systému RFEM z normových křivek dotvarování. Teoretické aspekty reologického modelu jsou shrnuty v části 4.2 a teorii vybraného algoritmu PSO je věnována kapitola 5.1.3. Provedená implementace byla verifikována vůči výsledkům dosaženým pomocí algoritmů dostupných v systému ANSYS, přičemž příslušné výsledky jsou dokumentovány v části 6.1.2 a výsledky vlastní identifikace parametrů *Kelvinova řetězce* jsou obsaženy v navazující části 6.1.3. Správnost provedené implementace a robustnost algoritmu je deklarována pomocí testovacích výpočtů, z nichž jsou v kapitole 5.2 představeny 2 dílčí výsledky na funkci s velkým množstvím lokálních minim a na silně nespojitě funkci.

### 4 TEORIE KOMPLEXNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ

Materiálová nelinearita je vedle geometrické nelinearity druhou nejrozsáhlejší oblastí teorie nelineární mechaniky. Vzniká jako důsledek změn v mikrostruktuře materiálu při působení zatížení, nicméně z pohledu běžně používaných výpočtů me-

---

<sup>1</sup>V textu je dále používána zkratka PSO – Particle Swarm Optimization Algorithm

todou konečných prvků se na chování materiálů obvykle pohlíží z makroměřítká, předpisem specifického konstitutivního vztahu (materiálového modelu). Základní dělení modelů lze provést podle jejich časové závislosti na *modely bez viskózního chování* (časově nezávislé) a *modely viskózní* (časově závislé). Skupinu časově nezávislých modelů lze dle charakteru odezvy při odtížení dle [57] dále dělit na *modely nelineárně elastické, elastoplastické* (modely plasticity) a *modely poškození*. V případě časově závislých modelů lze tyto dále dělit dle charakteru odezvy na *viskoelastické* a *viskoplastické*.

Odvození korektního materiálového modelu pro beton je relativně komplikované. Problém spočívá v odlišné odezvě na tahové a tlakové zatížení, kdy v tahu má beton výrazně nižší pevnost a chová se kvazi-křehce, zatímco tlaková oblast je charakteristická vyšší pevností a duktilnější odezvou [22]. Z tohoto důvodu se při matematickém popisu chování betonu využívá několika přístupů. Jedním z nich je využití teorie plasticity, která však nemusí být vzhledem k postupnému snižování tuhosti betonu vlivem vzniku trhlin dostatečná [8]. Zmiňovaný problém lze odstranit aplikací teorie poškození. Jak však tvrdí GRASSL [20], použití samostatného modelu poškození pro popis nevratných deformací a neelastických objemových změn betonu je také nedostačující. Vzhledem k uvedeným nedostatkům obou přístupů lze s výhodou využít jejich vzájemné kombinace. První skupina kombinovaných modelů je dle CICEKLIHO [8] založena na plasticitě formulované v prostoru efektivních napětí. Efektivní napětí v této skupině modelů se definuje jako průměrné napětí působící na nepoškozený materiál mezi defekty. Druhá skupina modelu je založena na plasticitě formulované v nominálním prostoru napětí [8]. U této skupiny modelů je nominální napětí definováno jako napětí působící jak na porušenou, tak neporušenou část materiálu.

V současnosti lze identifikovat ještě další významné proudy v oblasti modelování nelineárního chování betonu. Jeden z těchto proudů spočívá v rozšíření klasické metody konečných prvků FEM na tzv. rozšířenou metodu konečných prvků XFEM, u které se odstraňuje potřeba změny sítě konečných prvků při simulaci růstu trhliny. Podrobné informace lze nalézt v publikacích [5, 10, 53]. Další významný proud je založen na využití metody diskretních prvků DEM, jejíž popis je obsažen v pracích [9, 19].

V oblasti materiálových modelů vhodných pro řešení časově zpožděných jevů betonových konstrukcí lze za zcela fundamentální považovat práci BAŽANTA *a kol.* [1]. Podrobnou algoritmizaci těchto modelů pro účely řešení metodou konečných prvků lze nalézt v pracích TAYLORA *a kol.* [75] či SIMA *a kol.* [66, 67].

Vzhledem k rozsahu problematiky v oblasti materiálové nelinearity byla věno-

vána pozornost pouze materiálových modelům betonu, které však teoreticky pokrývají jak časově nezávislé modely, tak modely viskózní. Bližšímu zkoumání a k řešení problému identifikace parametrů byl jako zástupce neviskózních modelů vybrán materiálový model *Menetrey-Willam*. Text této teoretické kapitoly je dále věnován popisu viskózního modelu betonu založeného na *obecném Kelvinově řetězci*.

## 4.1 MATERIÁLOVÝ MODEL *MENETREY-WILLAM*

Materiálově nelineární výpočty v systému *ANSYS* lze přímo provádět jen pro úzkou skupinu materiálových modelů. Nicméně jejich počet lze rozšířit pomocí vlastních materiálových subrutin nebo externích databází, kterou je např. databáze *multiPlas* od německé firmy *Dynardo GmbH*. Na základě výsledků provedených numerických studií [24, 25] zabývajících se studiem použitelnosti vybraných materiálových modelů betonu byl pro identifikaci mechanicko-fyzikálních parametrů zvolen materiálový model označovaný jako *Menetrey-Willam*. Implementace tohoto konstitutivního vztahu v použité databázi vychází z prací publikovaných *MENETREYM* [51, 52].

Tento materiálový model náleží ke skupině modelů nezohledňující vliv rychlosti deformace na stav napětí a respektuje předpoklady přírůstkové teorie plasticity. Předpis funkce plasticity, jak ji lze nalézt v programovém manuálu [13] má tvar:

$$f_{MW} = A[\sqrt{2}\xi + r(\theta, e)\rho] + \frac{B\rho^2}{h(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q})} - h(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}) = 0 \quad (4.1)$$

S eliptickou funkcí  $r(\theta, e)$  vyvinutou *KLISINSKÝM* [38] dle [78], která zajišťuje transformaci kruhové dráhy polárního poloměru  $\rho(\theta)$  do třísymetrické elipsy [51]:

$$r(\theta, e) = \frac{4C \cos^2 \theta + D^2}{2C \cos \theta + D\sqrt{4C \cos^2 \theta + 5e^2 - 4e}} \quad (4.2)$$

Člen  $h(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q})$  v rovnici (4.1) je funkce zpevnění/změkčení a  $A, B, C, D$  jsou parametry modelu, jejichž podoba je dána následujícími vztahy

$$A = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[ \frac{1}{f_t} - \frac{1}{f_b} + \frac{f_b - f_t}{f_c^2} \right], \quad B = \frac{3}{2f_c^2}, \quad C = 1 - e^2, \quad D = 2e - 1, \quad (4.3)$$

kde parametr  $e$  v rovnici (4.3) lze dále rozepsat ve tvaru

$$e = \frac{f_b(f_c^2 - f_t^2) + f_t(f_b^2 - f_c^2)}{2f_b(f_c^2 - f_t^2) - f_t(f_b^2 - f_c^2)} \quad (4.4)$$

V uvedených parametrech modelu ve vztazích (4.3) – (4.4) se vyskytují základní mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu: jednoosá tlaková pevnost  $f_c$ , jednoosá tahová pevnost  $f_t$  a dvouosá tlaková pevnost  $f_b$ . Uvedené pevnosti musí plnit podmínku  $f_b > f_c > f_t$ . Nerovnost mezi tlakovou a tahovou pevností je v případě betonu splněna přirozeně. Splnění nerovnosti mezi dvouosou a jednoosou tlakovou pevností lze docílit přepsáním dvouosé pevností do tvaru  $f_b = kf_c$ , kde  $k > 1$ . Hodnota parametru  $k$  by se dle autorů SUCHARDY a BROŽOVSKÉHO [70] měla pohybovat okolo hodnoty 1,2. V rovnici pro plochu plasticity (4.1) se dále vyskytují souřadnice válcového Haigh-Westergaardova prostoru, v němž  $\xi$  představuje výšku,  $\rho$  představuje poloměr a  $\theta$  azimut. Uvedené válcové souřadnice lze vyjádřit pomocí invariantů  $I_1$ ,  $J_2$  a  $J_3$  následujícím způsobem

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}}, \quad \rho = \sqrt{2J_2}, \quad \cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}J_3}{2\sqrt{J_2^3}} \quad (4.5)$$

Vzhledem k implementaci úhlu  $\theta$  do předpisu funkce plasticity se zvolený materiálový model odlišuje od modelů využívajících plochy plasticity Drucker-Prager, které proto nemohou v některých případech zatěžování korektně aproximovat chování betonu. Materiálový model *Menetrey-Willam* se řadí do skupiny materiálových modelů s *neasociovaným zákonem plastického toku*. Toto tvrzení dokládá fakt, že plastický potenciál na rozdíl od plochy plasticity nebere v úvahu úhel  $\theta$  [13]. Předpis plastického potenciálu má tvar

$$g_{MW} = \rho^2 + X\rho + Y\xi, \quad (4.6)$$

kde parametry  $X$  a  $Y$  jsou opět vyjádřeny pomocí jednoosé tlakové pevnosti  $f_c$ , jednoosé tahové pevnosti  $f_t$ , dvouosé tlakové pevnosti  $f_b$  a dilatačního úhlu  $\psi$

$$X = \frac{2f_c \tan \psi - \sqrt{2}f_t}{\sqrt{3}(1 - \sqrt{2} \tan \psi)}, \quad Y = \frac{X}{\sqrt{2}} + \frac{2f_t}{\sqrt{3}}, \quad (4.7)$$

kde

$$\arctan \frac{f_t}{\sqrt{2}f_c} < \psi < \arctan \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 35,3^\circ \quad (4.8)$$

Z hlediska použití metody konečných prvků využívá zvolený materiálový model

konceptu rozetřených trhlin [61]. S ohledem na potřebu odstranění negativní závislosti řešení na velikosti sítě konečných prvků využívá nelineární model *Menetrey-Willam* BAŽANTOVA konceptu *Crack Band* [2]. Shrnutí všech vstupních mechanicko-fyzikálních, lomově-mechanických a dalších vnitřních parametrů popsaného modelu, které byly předmětem identifikace pomocí optimalizačních algoritmů prezentovaných v této práci, jsou shrnuty v níže uvedené tabulce 4.1

**Tabulka 4.1:** Vstupní parametry modelu *Menetrey-Willam* (*multiPlas/ANSYS*)

název parametru	jednotka	popis
$E$	[Pa]	modul pružnosti
$\nu$	[-]	Poissonův součinitel
$f_c, f_t$	[Pa]	jednoosá tlaková, tahová pevnost
$k$	[-]	poměr mezi biaxiální tlakovou pevností a jednoosou tlakovou pevností
$\psi$	[°]	dilatance
$\varepsilon_{ml}$	[-]	plastické přetvoření při maximálním zatížení
$G_{fc}, G_{ft}$	[Nm/m <sup>2</sup> ]	specifická lomová energie v tlaku, tahu
$\Omega_{ci}$	[-]	relativní úroveň napětí na začátku nelineárního zpevnění
$\Omega_{cr}, \Omega_{tr}$	[-]	reziduální relativní úroveň napětí v tlaku, tahu

## 4.2 KELVINŮV ŘETĚZEC

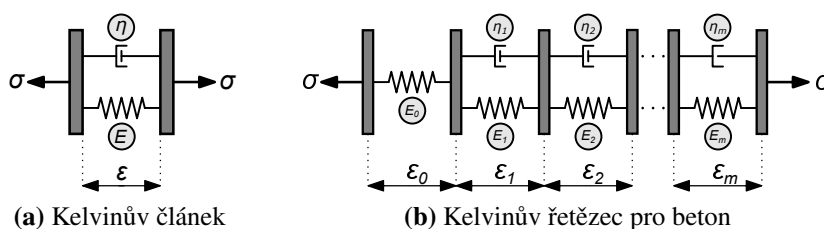
Kelvinův řetězec využívá principu superpozice účinků v jednotlivých časových okamžicích historie zatížení. Vzhledem k tomuto předpokladu lze historii přetvoření zapsat pomocí vztahu

$$\varepsilon(t) = \sigma J(t, t'), \quad (4.9)$$

kde  $J(t, t')$  je funkce poddajnosti, vyjadřující poměr deformace v čase  $t$  a napětí, které tuto deformaci způsobilo v čase  $t'$ , od kterého působí konstantně. V rámci řešeného problému je navíc uvažován bez stárnutí a funkci poddajnosti lze tedy zapsat takto

$$J(t, t') = J_0(t - t'). \quad (4.10)$$

V případě jednoduchého *Kelvinova článku* (obrázek 4.1a), který tvoří základní jed-



**Obrázek 4.1:** Reologická schémata

notku použitého řetězce, lze předpis pro funkci poddajnosti získat jako řešení rovnice

$$\sigma_e + \sigma_v = \sigma, \quad (4.11)$$

kde  $\sigma_e$  je elastické napětí v pružině článku,  $\sigma_v$  je viskózní (zpožděné) napětí v tlumiči článku a  $\sigma$  je konstantní napětí, kterým je článek zatížen od času  $t' = 0$ . Dosadí-li se za  $\sigma_e = E\varepsilon(t)$  a za  $\sigma_v = \eta\dot{\varepsilon}(t)$  získáme diferenciální rovnici

$$E\varepsilon(t) + \eta\dot{\varepsilon}(t) = \sigma, \quad (4.12)$$

jejíž řešení, jestliže  $\varepsilon(0) = 0$ , má tvar

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}\right) \quad (4.13)$$

a hledaná funkce poddajnosti má tedy podobu

$$J_0(t) = \frac{1}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}\right) H(t), \quad (4.14)$$

kde  $H(t) = 1$ , když  $t > 0$  a  $H(t) = 0$ , když  $t = 0$ . Zapojením několika těchto článků do série získáme reologické schéma zvané *Kelvinův řetězec*, jehož podoba je znázorněna na obrázku 4.1b. Takto sestavený řetězec přináší výhodu ve větším množství tuhostních a viskózních parametrů, díky kterým lze lépe aproximovat skutečné chování materiálu. Funkce poddajnosti pro *Kelvinův řetězec* lze získat analogickým postupem a její tvar lze zapsat jako

$$J_0(t) = \left[ \frac{1}{E_0} + \sum_{j=1}^M \frac{1}{E_j} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}\right) \right] H(t), \quad \text{kde } \tau_j = \frac{\eta_j}{E_j} \quad (4.15)$$

je tzv. *retardační čas*  $j$ -tého článku. Pravá strana rovnice (4.15) je tvořena řadou s exponenciálními členy, která se označuje jako *Dirichletova* či *Pronyho* řada [1].

## 5 TEORIE OPTIMALIZACE

Optimalizaci lze v užším pojetí chápat jako technickou (fyzikální, ekonomickou, vojenskou, logistickou) aplikaci matematické analýzy extrémů funkcí [47]. Dle RAA [62, s. 1] lze optimalizaci obecně formulovat jako *proces hledání nejlepšího výsledku za daných okolností*, což z pohledu technických oborů lze v rámci rozhodovacích procesů popsat jako snahu o minimalizaci úsilí při maximalizaci zisku. Z pohledu funkcionální analýzy se jedná o hledání minima resp. maxima funkce,



přičemž lze bez ztráty obecnosti dokázat, že má-li reálná funkce  $f(x)$  minimum v bodě  $x^*$  pak je tento bod maximum funkce  $-f(x)$  [62, s. 1]. Matematicky lze tedy optimalizaci formulovat takto

$$\text{Najdi } \mathbf{X} = \{x_1; x_2; \dots; x_n\}^T, \text{ min. } f(\mathbf{X})$$

při splnění podmínek

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, j = \{1; 2; \dots; k\}; h_j(\mathbf{X}) = 0, j = \{1; 2; \dots; l\} \quad (5.1)$$

kde  $\mathbf{X}$  je vektor návrhových proměnných (návrhový vektor),  $f(\mathbf{X})$  je účelová funkce (fitness) a  $g_j(\mathbf{X})$  resp.  $h_j(\mathbf{X})$  jsou nerovnostní resp. rovnostní omezení. V případě, že optimalizační problém má definované podmínky ve tvaru (5.1), pak se takový problém označuje jako *omezený*, v opačném případě není-li žádná podmínka definována, tak se řešení hledá v kompletním  $N$  dimenzionálním návrhovém prostoru a problém se označuje jako *neomezený*.

Vedle uvedeného základního dělení optimalizačních problémů lze provést členění dle přípustnosti hodnot návrhových proměnných na problémy *diskrétní*, v nichž návrhové proměnné mohou nabývat pouze celočíselných hodnot a *spojité*, ve kterých se návrhové proměnné uvažují z množiny  $\mathbb{R}^3$ . Optimalizační problémy lze dále členit dle počtu a matematického tvaru účelové funkce. Z hlediska počtu účelových funkcí se problémy dělí na *jednoúčelové (single-objective)* a *víceúčelové (multi-objective)*. Optimalizační problémy lze dle tvaru účelové funkce dělit jako v [62] na: (a) *problémy lineárního programování*; (b) *problémy kvadratického programování*; (c) *problémy nelineárního programování*; (d) *problémy geometrického programování*.

Z hlediska zaměření této práce lze ještě optimalizační úlohy dělit s ohledem na aplikační oblast. Přičemž z širokého pole využití optimalizace lze jmenovat například: *návrh leteckých a kosmických zařízení, návrh optimálních trajektorií letu, konstrukční optimalizace, návrh vodních zdrojů, návrh elektrických sítí, návrh zásobovacích tras, alokace zásob* ad. V literatuře se lze setkat ještě s pojmem *globální optimalizace*, čímž se dle [46] dá rozumět optimalizace funkcí bez znalosti technické podstaty problému, zatímco v případě *konstrukční optimalizací* se jedná o využití metod globální optimalizace na problémy návrhu konstrukcí. Právě znalost technické či fyzikální podstaty problému umožňuje efektivně modifikovat dostupné algoritmy.

## 5.1 OPTIMALIZAČNÍ METODY

Pro účely této práce lze provést dělení optimalizačních metod do tří základních skupin dle použitého matematického aparátu, tvaru účelové funkce a využití prvků umělé inteligence.

### 5.1.1 Klasické metody

Jedná se o skupinu metod zabývajících se vyšetřování průběhu funkcí jedné a více proměnných. Výchozí podmínkou pro aplikaci těchto metod je diferencovatelnost vyšetřovaných účelových funkcí, což značně zužuje aplikační oblast.

### 5.1.2 Metody matematického programování

Metody matematického programování tvoří nejrozsáhlejší skupinu a lze ji vnitřně dále dělit dle tvaru použité účelové funkce. První skupinu tvoří **metody lineárního programování** (dále jen LP), kde lze za nejznámější považovat *simplexovou metodu* představenou G. DANTZINGEM pro řešení problémů optimální alokace zdrojů. RAO v [62, s. 120] klade důraz dále na *Karmarkarovu metodu* [36], která oproti simplexové metodě vyniká vyšší rychlostí.

Druhou rozsáhlou skupinu metod tvoří **metody nelineárního programování** (dále jen NLP), u nichž jsou účelová funkce a omezující podmínky v nelineárním tvaru, popřípadě *nejsou explicitně vyjádřeny*. Metody v této skupině lze dle [21] rozdělit na metody NLP pro *neomezené* a *omezené problémy*. Do první skupiny patří: (a) optimalizační procedury využívající derivací (1. řádu); (b) optimalizační procedury bez využití derivací (vyhledávací metody 0. řádu, např. *Nelder-Meadova metoda* [55]). Do metod pro omezené problémy NLP lze zařadit: (a) aproximační metody; (b) penalizační metody a (c) toleranční metody.

Další skupiny metod matematického programování jsou metody pro **geometrické programování**, **dynamické programování**, **stochastické programování** a metody pro **celočíslné programování**. Ty jsou významné z hlediska řešení technických úloh, jelikož rozsáhlá množina optimalizačních problémů obsahuje návrhové proměnné ve formě množin diskrétních parametrů (např.: výrobní řady profilů, délkové moduly). Metody celočíselného programování lze s ohledem na tvar účelové funkce dále dělit na metody celočíselného lineárního programování a metody nelineárního celočíselného programování.



### 5.1.3 Moderní metody

Moderní metody optimalizace představují odklon od tradičních metod matematického programování a funkcionální analýzy, přičemž inspiraci nacházejí nejčastěji v přírodních procesech. Mezi nejznámější patří *genetické algoritmy* [32], které využívají principů Darwinovy teorie a genetických procesů. Druhým velmi známým je *algoritmus hejna částic (Particle Swarm Algorithm)* představený v [37] využívající principů chování živočichů hledajících ve skupinách potravu. Jako další zástupce lze dle [62] jmenovat: *simulované žitání, algoritmus mravenčích kolonií, fuzzy optimalizaci a metody založené na umělých neuronových sítích*.

Při zkoumání možností nasazení optimalizace na problémy identifikace parametrů materiálových modelů bylo využito genetického algoritmu MOGA, který je v systému ANSYS implementován jako hybridní varianta algoritmu NSGA-II (*Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II*) [11]. Z hlediska plnění cílů dizertační práce a pro účely řešení úloh konstrukční optimalizace byla provedena implementace algoritmu hejna částic PSOA.

#### Algoritmus Particle Swarm (PSOA)

Jedná se o meta-heuristickou, behaviorální metodu, která tvoří určitou opozici vůči evolučním metodám (např. genetickým algoritmům). Algoritmus byl poprvé představen KENNEDYEM a EBERHARTEM v [37] a dle zmiňovaných autorů využívá hybridnosti k akceleraci konvergence vstříc minimu účelové funkce [39, s. 158]. Částicí je představována konkrétní realizace návrhového vektoru  $\mathbf{X}^{(i)}$ , přičemž je-li populace o velikosti  $j$ , tak má každá částice v  $i$ -té iteraci dvě charakteristiky: *polohu*  $\mathbf{X}_j^{(i)}$  (souřadnice polohy jsou jednotlivé návrhové proměnné) a navíc *rychlost*  $\mathbf{V}_j^{(i)}$ . Algoritmus se zahajuje náhodným rozmístěním částic v návrhovém prostoru. Tyto částice poté v průběhu iterací aktualizují polohu a ukládají si informaci o dosavadní nejlepší vlastní poloze (s nejnižší hodnotou účelové funkce – *Personal Best*)  $\mathbf{P}_{best,j}$  a vyměňují si informaci o globálně nejlepší poloze (částice s nejnižší hodnotou účelové funkce – *Global Best*)  $\mathbf{G}_{best}$  [62]. Aktualizace polohy částice lze tedy formálně zapsat takto

$$\mathbf{X}_j^{(i)} = \mathbf{X}_j^{(i-1)} + \mathbf{V}_j^{(i)}, \quad (5.2)$$

v rámci kterého

$$\mathbf{V}_j^{(i)} = w \cdot \mathbf{V}_j^{(i-1)} + c_1 \cdot \mathbf{r}_1 \cdot [\mathbf{P}_{best,j} - \mathbf{X}_j^{(i-1)}] + c_2 \cdot \mathbf{r}_2 \cdot [\mathbf{G}_{best} - \mathbf{X}_j^{(i-1)}], \quad (5.3)$$

kde  $w$  je koeficient setrvačnosti zaváděný s ohledem na tlumení rychlosti hejna, aby nedocházelo k oscilacím na konci iterační procesu, kde se očekává pohyb v malé oblasti okolo globálního minima. Setrvačnost lze dle [65] zapsat v podobě

$$w = \Psi_{max} - \left( \frac{\Psi_{max} - \Psi_{min}}{N_{iter}} \right) i \quad (5.4)$$

kde  $i$  je číslo aktuální iterace,  $i_{max}$  maximální počet iterací a  $\Psi_{max}$  resp.  $\Psi_{min}$  je maximální resp. minimální hodnota setrvačnosti, přičemž v provedené implementaci jsou použity hodnoty  $\Psi_{max} = 0,9$  a  $\Psi_{min} = 0,4$ . V rovnici (5.3) se objevuje výraz

$$c_1 \cdot \mathbf{r}_1 \cdot \left[ \mathbf{P}_{best,j} - \mathbf{X}_j^{(i-1)} \right]$$

představující *vlastní inteligenci* částice a kde  $c_1$  je kognitivní součinitel nabývající obvykle hodnoty 2,0 a  $\mathbf{r}_1$  je vektor váhových součinitelů s náhodnou hodnotou dle normálního rozdělení  $\mathbf{r}_1 \in U(0, 1)$ . Ve stejné rovnici (5.3) se dále objevuje výraz

$$c_2 \cdot \mathbf{r}_2 \cdot \left[ \mathbf{G}_{best} - \mathbf{X}_j^{(i-1)} \right],$$

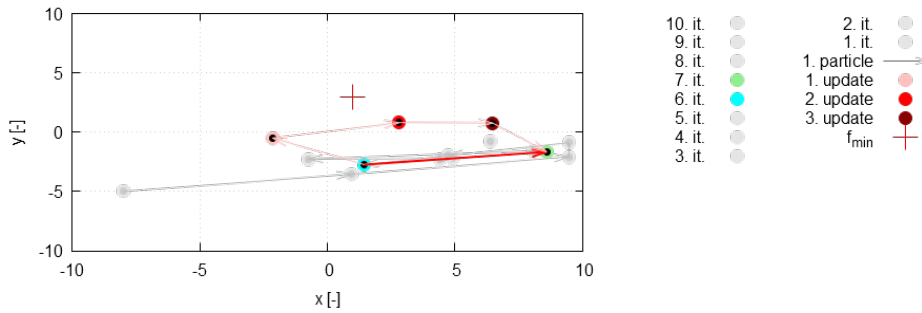
kteřý představuje *inteligenci hejna* částic a kde  $c_2$  je sociální součinitel učení nabývající obvykle hodnoty 2,0 a  $\mathbf{r}_2$  je opět vektor váhových součinitelů s náhodnou hodnotou dle normálního rozdělení  $\mathbf{r}_2 \in U(0, 1)$ .

Mechanismus aktualizace polohy mezi iteracemi je graficky znázorněn na níže uvedeném obrázku 5.1, kde poloha označená bodem ( $\bullet$ ) je dána tlumením rychlosti z předchozí iterace součinitelem setrvačnosti. Následná korekce polohy s ohledem na nejlepší polohu dané částice je označena bodem ( $\bullet$ ). Finální korekce polohy s ohledem na globálně nejlepší polohu je označena bodem ( $\bullet$ ).

Algoritmus lze použít pro řešení neomezených i omezených optimalizačních problémů, kde se pro znevýhodnění nepřijatelných řešení nevyhovujících omezujícím podmínkám využívá penalizace účelové funkce např. ve tvaru dle RAA [62, s. 711]. V provedené implementaci bylo s ohledem na požadavek dodržovat uživatelem zadané intervaly návrhových proměnných, využito striktní penalizace ponecháním částice v původní poloze:  $\mathbf{X}_j^{(i)} = \mathbf{X}_j^{(i)}$  a vynulováním rychlosti  $\mathbf{V}_j^{(i)} = 0, 0$ .

Popsaný algoritmus byl vybrán k implementaci vzhledem k výbornému poměru přesnosti a robustnosti, která je dokumentována provedenými testy v kapitole 5.2.

S ohledem na nasazení algoritmu pro řešení úloh konstrukční optimalizace (rozměrové a tvarové) v programu *RFEM* byla implementace provedena tak, že návrhové proměnné mohou nabývat jak čisté reálných hodnot, tak diskrétních reálných a celých čísel.



**Obrázek 5.1:** Rozložení aktualizace polohy v alg. PSOA na funkci Booth [71]

## 5.2 TESTY IMPLEMENTOVANÝCH ALGORITMŮ

Implementace algoritmu PSOA realizovaná v rámci dizertační práce pro řešení inverzní identifikace parametrů materiálových modelů byla provedena v takové obecnosti, aby byla použitelná i pro řešení klasických úloh konstrukční optimalizace. S ohledem na obecně vysoké požadavky kvality software při komerčním nasazení bylo při implementaci provedeno komplexní testování, k němuž bylo použito obecně známých a používaných funkcí, označovaných také jako *umělé krajiny*<sup>1</sup>. Jejich primárním cílem je prověření základních charakteristik algoritmů, kterými jsou [77]: míra konvergence, přesnost, robustnost a výkon.

Z řady dostupných testů optimalizačních algoritmů byly vybrány takové účelové funkce, aby byly ověřeny základní charakteristiky jak ve 2D, tak vícedimenzionálním návrhovém prostoru při velkém množství lokálních minim, existenci dlouhých údolí, omezení oblasti přípustných řešení a nespojitostech oblasti přípustných řešení. Vzhledem k rozsahu dokumentu budou v následujícím textu představeny výsledky na funkci *Ackley* [72] ve 2D a silně nespojitě 2D funkci *Gomez-Levy* [64]

### 5.2.1 Funkce Ackley (2D)

Testovací funkce Ackley je dle [72]  $N$  dimenzionální (ND) funkce s předpisem

$$f(\mathbf{x}) = -a \cdot e^{-b\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}} - e^{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos cx_i} + a + e \quad (5.5)$$

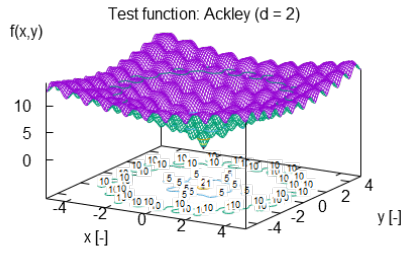
Pro účely testování implementovaných algoritmů byla použita její 2D varianta ve tvaru

$$f(x_i) = -20 \cdot e^{-0,2\sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 x_i^2}} - e^{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \cos 2\pi x_i} + 20 + e \quad (5.6)$$

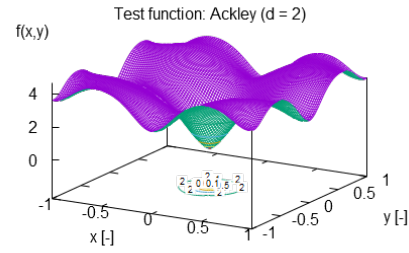
s globálním minimem o hodnotě 0,0 v bodě

$$f_{g,min}(0; 0) = 0, 0 \quad (5.7)$$

<sup>1</sup>V angl. originále: *artificial landscapes*



(a) 3D



(b) detail 3D

**Obrázek 5.2:** Funkce Ackley

Test algoritmu PSOA s předpokladem spojitého charakteru parametrů  $\mathbf{X}^c$  byl proveden na doméně ve tvaru čtverce  $x_i^c \in \langle -5, 0; 5, 0 \rangle$  a pro test algoritmu s předpokladem diskrétního charakteru parametrů  $\mathbf{X}^d$  byla použita identická doména  $x_i^d \in \langle -5, 0; 5, 0 \rangle$  s krokem 0,001. Výsledky dokumentující konvergenci a robustnost řešení pomocí algoritmu PSOA pro oba charaktery parametrů na dané testovací funkci jsou zobrazeny na grafech v 5.3a a 5.3b. Vývoj populace je demonstrován na 5.3c a 5.3d. Numerické srovnání dosažených výsledků testu je provedeno v tabulce 5.1.

**Tabulka 5.1:** Dosažené výsledky alg. PSOA při testu na funkci Ackley

char. parametru	nastavení	$\mathbf{X}$	$f_{g,min}^{\text{PSOA}}$ [-]	$ \Delta $ [-]	$ \delta $ [%]
$\mathbf{X}^c$	populace: 100, iterace: 20	$(0, 008; 0, 000)^T$	0,025	0,025	-
$\mathbf{X}^c$	populace: 50, iterace: 40	$(-0, 0002; -0, 0002)^T$	0,007	0,007	-
$\mathbf{X}^d$	populace: 100, iterace: 20	$(-0, 020; -0, 020)^T$	0,101	0,101	-
$\mathbf{X}^d$	populace: 50, iterace: 40	$(0, 002; 0, 001)^T$	0,006	0,006	-

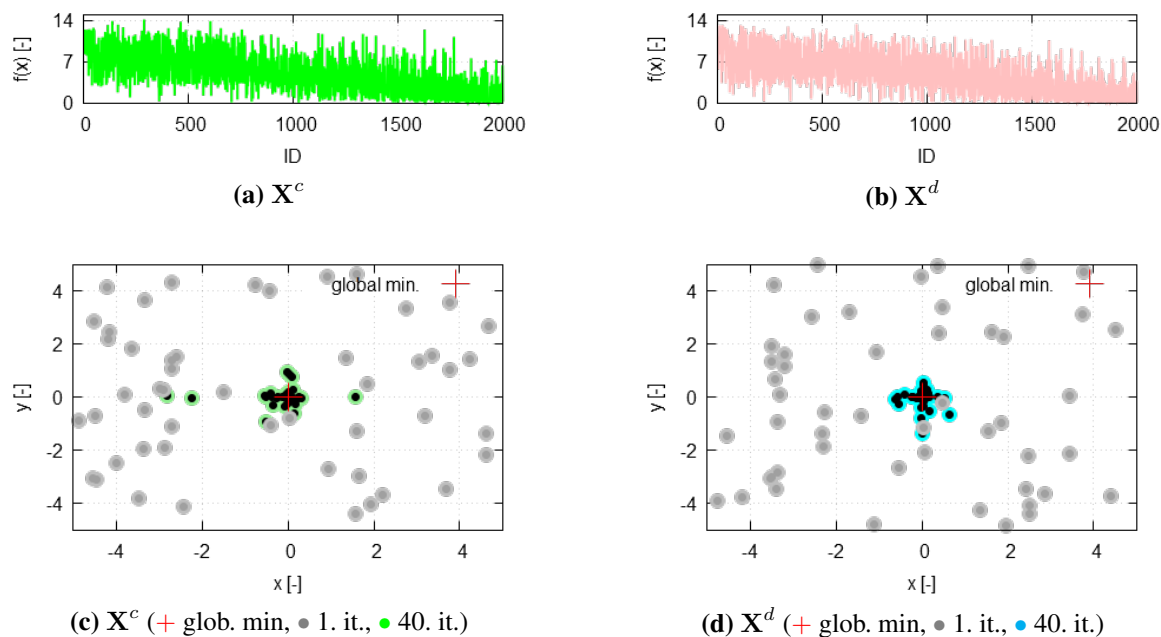
### 5.2.2 Funkce Gomez-Levy (2D)

Testovací funkce Gomez-Levy je dle [64] dvoudimenzionální (2D) funkce s předpisem

$$f(x_1, x_2) = \left( 4 - 2, 1 \cdot x_1^2 + \frac{x_1^4}{3} \right) x_1^2 + x_1 \cdot x_2 + (-4 + x_2^2)x_2^2, \quad (5.8)$$

jejíž globální minimum leží dle [64] v bodě  $(0, 109; -0, 623)$  a má hodnotu

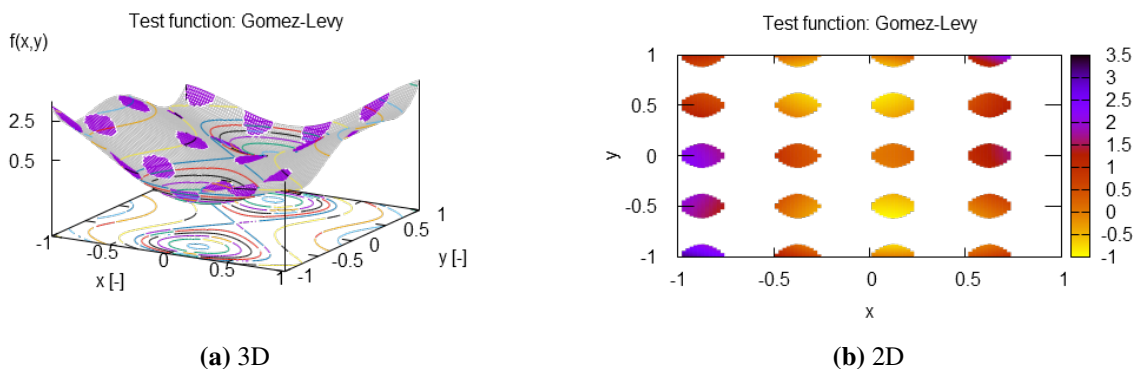
$$f_{g,min}(0, 109; -0, 623) = -0, 9711, \quad (5.9)$$



**Obrázek 5.3:** Výsledky testu alg. PSOA na funkci Ackley (it.: 40, pop.: 50)

a na které lze vymezit oblast přípustných řešení splňujících nerovnost

$$-\sin(4\pi x_1) + 2\sin^2(2\pi x_2) \leq 0, 0 \quad (5.10)$$



**Obrázek 5.4:** Funkce Gomez-Levy (2D) s omezením přípustných řešení

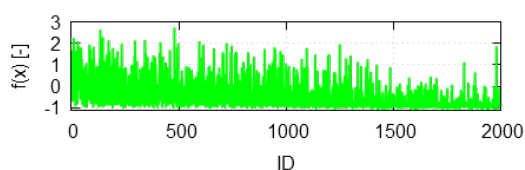
Pro účely testování algoritmu PSOA s předpokladem spojitého charakteru parametrů  $\mathbf{X}^c$  byla zvolena doména ve tvaru čtverce  $x_i^c \in \langle -1, 0; 1, 0 \rangle$  a pro test algoritmu s předpokladem diskrétního charakteru parametrů  $\mathbf{X}^d$  byla použita identická doména  $x_i^d \in \langle -1, 0; 1, 0 \rangle$  s krokem 0,001. Podoba funkce na definované doméně je zobrazena na obrázcích 5.4a a 5.4b.

Konvergence a robustnost řešení pomocí algoritmu PSOA pro oba charaktery parametrů na dané testovací funkci jsou dokumentovány na grafech 5.5a – 5.5b a

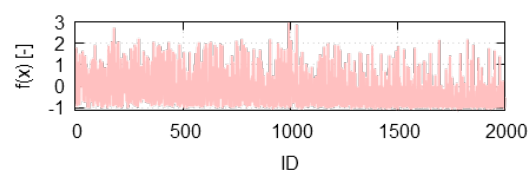
dále na obrázcích 5.5c a 5.5d je vidět vývoj populace částic mezi 1. a poslední iterací. Numerické srovnání dosažených výsledků testu je provedeno v tabulce 5.2.

**Tabulka 5.2:** Dosažené výsledky alg. PSOA při testu na funkci Gomez-Levy

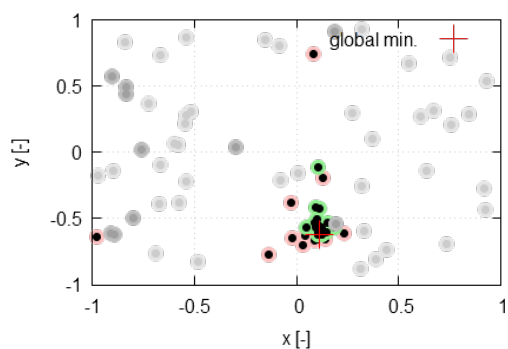
char. parametru	nastavení	$\mathbf{x}$	$f_{g,min}^{PSOA}$ [-]	$ \Delta $ [-]	$ \delta $ [%]
$\mathbf{X}^c$	populace: 100, iterace: 20	$(0, 108; -0, 623)^T$	-0,971	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,01
$\mathbf{X}^c$	populace: 50, iterace: 40	$(0, 109; -0, 623)^T$	-0,970	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,11
$\mathbf{X}^d$	populace: 100, iterace: 20	$(0, 108; -0, 623)^T$	-0,971	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,01
$\mathbf{X}^d$	populace: 50, iterace: 40	$(0, 113; -0, 622)^T$	-0,968	$3,1 \cdot 10^{-3}$	0,32



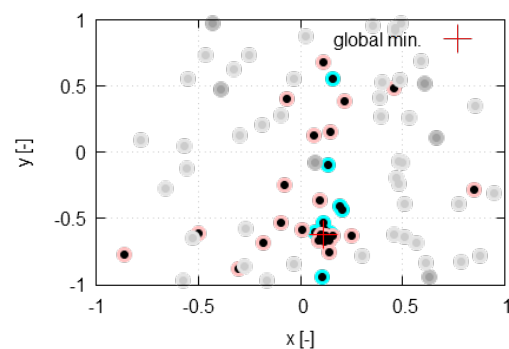
(a)  $\mathbf{X}^c$



(b)  $\mathbf{X}^d$



(c)  $\mathbf{X}^c$  (+ glob. min., ● 1. it., ●/● 40. it.)



(d)  $\mathbf{X}^d$  (+ glob. min., ● 1. it., ●/● 40. it.)

**Obrázek 5.5:** Výsledky testu alg. PSOA na funkci Gomez-Levy (it.: 40, pop.: 50)

## 6 APLIKACE OPTIMALIZACE NA PROBLÉMY MECHANIKY STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ

Uplatnění optimalizace v oblasti mechaniky stavebních konstrukcí lze nalézt v typických minimalizačních a maximalizačních úlohách, jejichž cílem je dosažení optimálního návrhu s minimální spotřebou materiálu či maximálního využití konstrukčních prvků při dodržení stanovených návrhových kritérií. Dle CHRISTENSENA a KLARBIRNGA [7] lze definici tzv. konstrukční optimalizace definovat jako snahu o nalezení dostatečné tuhosti popř. minimalizace citlivosti na ztrátu stability.

Masivní využití počítačů pro návrh a statické posouzení konstrukcí, jejich hardwarová vybavenost a možnosti paralelizace výpočtu v cloudech umožňuje v dnešní době provádět analýzy konstrukcí v řádech od několika sekund po desítky minut. Z tohoto pohledu jsou vytvořeny výborné předpoklady pro běžné nasazení optimalizačních technik v každodenní praxi. Z pohledu praktického použití při návrhu konstrukce lze úlohy konstrukční optimalizace dle [7] dělit na: (a) *rozměrovou optimalizaci*, ve které se jako návrhová proměnná uvažuje průřezová charakteristika v případě prutových konstrukcí nebo tloušťka v případě plošných konstrukcí; (b) *tvarovou optimalizaci*, v rámci které se jako návrhová proměnná uvažuje tvar konstrukce např. ve smyslu náběhu u prutových konstrukcí, popř. proměnné tloušťky u plošných konstrukcí; (c) *topologickou optimalizaci*, která tvoří obecnou nadmnožinu výše uvedeným typům a jejíž cílem je nalezení optimálního konstrukčního systému pro přenesení uvažovaného zatížení.

Zmíněné typy úloh konstrukční optimalizace lze s ohledem na povahu návrhových proměnných zařadit pod oblast *geometrické optimalizace*. Výše zmíněné použití výkonných počítačů pro analýzu konstrukcí pomocí statických softwarových balíčků, v nichž jsou implementovány numerické algoritmy pro geometricky a materiálově nelineární úlohy rozšiřuje pole působnosti optimalizace do další sféry: *materiálové optimalizace*. V rámci této oblasti lze definovat úlohu: *identifikace parametrů materiálových modelů*, při níž jsou pomocí vhodných technik hledány předem neznámé hodnoty parametrů vystupujících v příslušných konstitutivních vztazích.

## 6.1 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MATERIÁLOVÝCH MODELŮ

Pro demonstraci metody inverzní identifikace pomocí optimalizace byly provedeny celkem dvě dílčí studie. První byla realizována na materiálovém modelu *Menetrey-Willam* z databáze *multiPlas* v systému *ANSYS*, který disponuje optimalizačními nástroji, čímž byla zároveň umožněna verifikace implementace a použití algoritmu *PSOA* na danou problematiku. Druhá dílčí studie byla věnována identifikaci parametrů *Kelvinova řetězce*, implementovaného v systému *RFEM* pro účely modelování viskózního chování betonu.

### 6.1.1 Identifikace na modelu *Menetrey-Willam* použitím *MOGA*

Podstatou inverzní identifikace využívající vhodného optimalizačního algoritmu je opakovaný numerický výpočet daného experimentu, při kterém je vektor návrhových proměnných tvořen neznámými materiálovými parametry. Optimalizační úloha



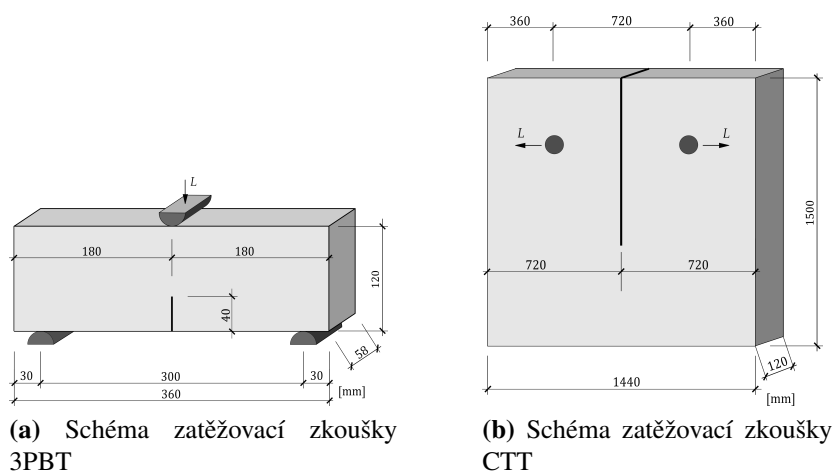
se v takovém případě definuje jako minimalizace funkce představující diskrepanci mezi experimentální a numerickou zatěžovací křivkou. Za identifikované parametry jsou pak považovány ty, pro které je hodnota cílové funkce nejnižší. V procesu inverzní identifikace lze dále využívat analýzy citlivosti pro analýzu chování numerického modelu a také pro redukci dimenze návrhového vektoru, čímž dochází ke snížení časové náročnosti výpočtu [23].

Problematika identifikace parametrů zvoleného elastoplastického modelu byla uskutečněna nejprve s pomocí optimalizačního modulu systému *ANSYS Workbench* a to na dvou zatěžovacích křivkách pocházejících z experimentálních vyšetřování publikovaných v odborných publikacích [69] a [79]. Výsledky provedených analýz byly publikovány autorem v [26, 27, 28, 29].

## Experimentální data

V první výše citované publikaci [69] byly prezentovány zkoušky v tříbodovém ohybu (3PBT) na čtyřech sadách vzorků se zářezem o rozměrech 360 x 120 x 58 mm z betonu pevnostní třídy C25/30 dle normy ČSN EN 1992-1-1 [68]. Pro účely identifikace byla vybrána jedna zatěžovací křivka příslušící vzorku dle obrázku 6.1a se stupněm rozlití F45 o stáří 28 dní.

Z druhého zmiňovaného zdroje [79] byla adaptována závislost  $L - CMOD$  pocházející tahového experimentu *Compact Tension Test* (CTT). V citované publikaci byly prezentovány experimenty na celkem 14 vzorcích s rozdílnými dimenzemi, vlastnostmi betonu a pro několik zatěžovacích rychlostí. Pro účely studie byla vybrána výsledná  $L - CMOD$  křivka pro největší vzorek, jehož rozměry jsou uvedeny na obrázku 6.1b.

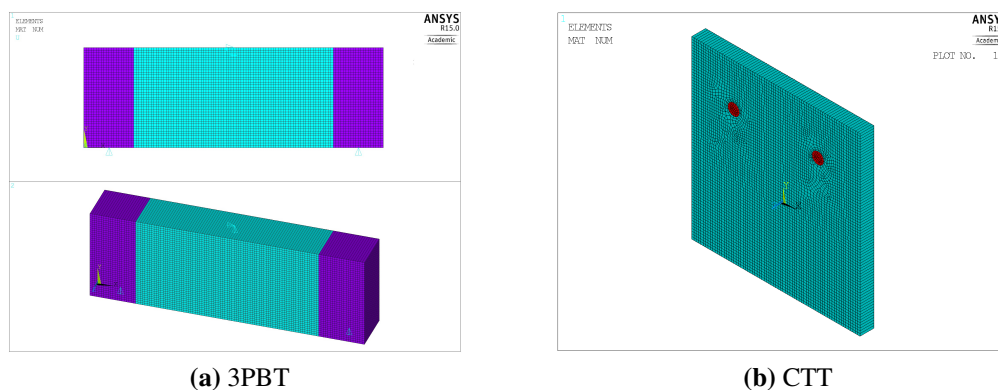


**Obrázek 6.1:** Schémata experimentů



## Výpočtové modely

Vzhledem k úspoře výpočetního času nelineární simulace byla v obou studiích redukována komplexnost úlohy z 3D na 2D úlohu rovinné napjatosti. V rámci zjednodušení byly v případě 3PBT modifikovány také okrajové podmínky, kdy namísto modelování kovových podporových segmentů s kontaktem mezi materiály bylo z hlediska korektní idealizace úlohy zabráněno pouze svislému posunu v místech těchto podpor. Zjednodušení se týkalo také oblasti vnášení zatížení, kde opět nebyl modelován kontakt, ale namísto toho byla předepsána svislá deformace. S ohledem na řešitelnost dané úlohy bylo zabráněno vodorovnému posunu v místě vnášeného zatížení, čímž se zachovala symetrie experimentu. Geometrie výpočtového modelu byla pokryta sítí rovinných čtyřuzlových prvků označovaných PLANE182 se třemi stupni volnosti v každém z uzlů. S ohledem na redukci nároků na výpočetní čas byla geometrie pokryta pravidelnou čtvercovou sítí o velikosti 3,0 mm. Odpovídajícího rozměru ve zbývajícím třetím směru bylo dosaženo předepsáním tloušťky prvku o velikosti  $w = 58$  mm. Speciální úpravu výpočtového modelu si vyžádala oblast v okolí podpor. Vzhledem ke zvoleným okrajovým podmínkám se jednalo o oblast potenciálního výskytu lokálních špiček napětí a tak byl prvkům v pásech širokých 60 mm nad oběma podporami předepsán elastický materiál. Geometrie výpočto-



**Obrázek 6.2:** Výpočtové modely v systému ANSYS

vého modelu lomového CT testu v rozměrech uvedených na obrázku 6.1b byla také s ohledem na úsporu výpočetního času simulace pokryta sítí rovinných čtyřuzlových konečných prvků (PLANE182) s tloušťkou prvku o velikosti 120 mm. Zářez byl na vzorku modelován pomocí dvojice linií se sdíleným uzlem ve vrcholu zářezu. Zatížení bylo do modelu vnášeno jako předepsaná vertikální deformace o velikosti 0,00062 m. Uvedené zatížení bylo předepsáno na středovém uzlu ocelových válců modelovaných pomocí stejných rovinných prvků. Uvedený způsob modelování vnášeného zatížení vyžadoval použití *Langrangeova* kontaktního algoritmu na

rozhraní beton-ocel. Pro vymodelování kontaktu bylo využito prvků CONTA171 a TARGE169.

## Účelová funkce

Základní princip identifikace založené na využití optimalizačních metod je minimalizace diskrepance mezi experimentální a numerickou  $L - d$  křivkou. Pro výpočet difference mezi dvěma křivkami lze dle HYNDMANA a kol. [33] využít tzv. RMSE chyby, která se běžně využívá k evaluaci matematických modelů v demografii, meteorologii a ekonomice. Výpočet RMSE chyby lze provést dle následujícího vztahu

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2}{n}}, \quad (6.1)$$

kde  $y_i^*$  je hodnota síly z numerické simulace a  $y_i$  je hodnota síly na experimentální  $L - d$  křivce a  $n$  je počet bodů křivky.

Při inverzní identifikaci bylo v rámci řešených studií [31] využito také formulace účelové funkce jako rozdíl ploch  $A_{Ld,ref}$  pod referenční  $L - d$  křivkou a plochy  $A_{Ld,num}$  pod numericky spočítanou  $L - d$  křivkou

$$\Delta A_{Ld} = A_{Ld,ref} - A_{Ld,num} \quad (6.2)$$

a také rozdílu maximálních hodnot zatížení  $L_{max,ref}$  a  $L_{max,num}$  ve tvaru:

$$\Delta L_{max} = L_{max,ref} - L_{max,num} \quad (6.3)$$

## Analýza citlivosti

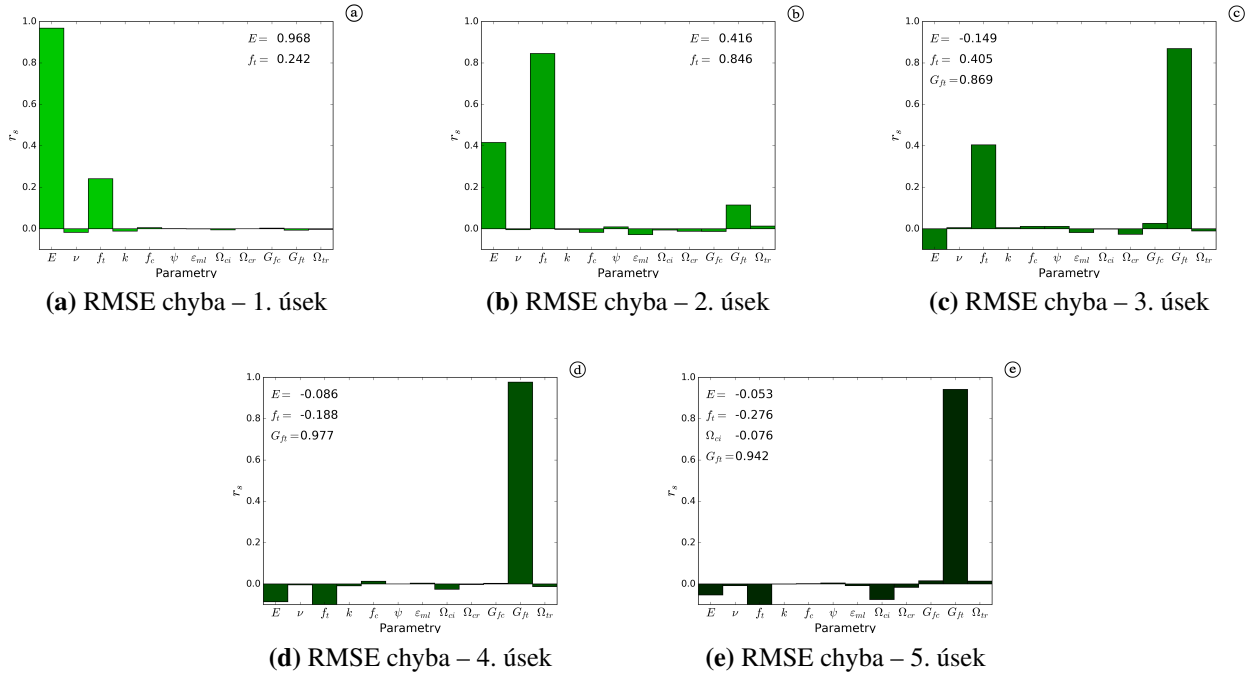
Při řešení dizertační práce byla provedena studie [31], jejíž základním cílem bylo provedení analýzy citlivosti využívající RMSE chyby. V rámci této studie byla provedena analýza pro 5 rovnoměrně rozdělených úseků  $L - d$  křivky. Vlastní citlivost byla vyjádřena pomocí Spearmanova korelačního koeficientu  $r_s$

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad \text{kde } \delta_i = \text{rank}(X_i) - \text{rank}(Y_i) \quad (6.4)$$

je rozdíl pořadí mezi hodnotami jednoho parametru a cílové funkce a  $n$  představuje počet simulací v rámci analýzy.

Výsledky této analýzy jsou uvedeny na obrázcích 6.3a až 6.3e, přičemž byla zachycena významná citlivost na modul pružnosti  $E_c$  a tahovou pevnost  $f_t$ , nicméně

jak ukazují grafy na obrázcích 6.3a a 6.3b vyšší citlivost na modul pružnosti byla zaznamenána v prvním úseku, zatímco v druhém úseku dominovala tahová pevnost. V dalších částech se významně projevila citlivost na specifickou lomovou energii  $G_{ft}$ . V těchto částech byla navíc zaznamenána negativní závislost na tahovou pevnost.

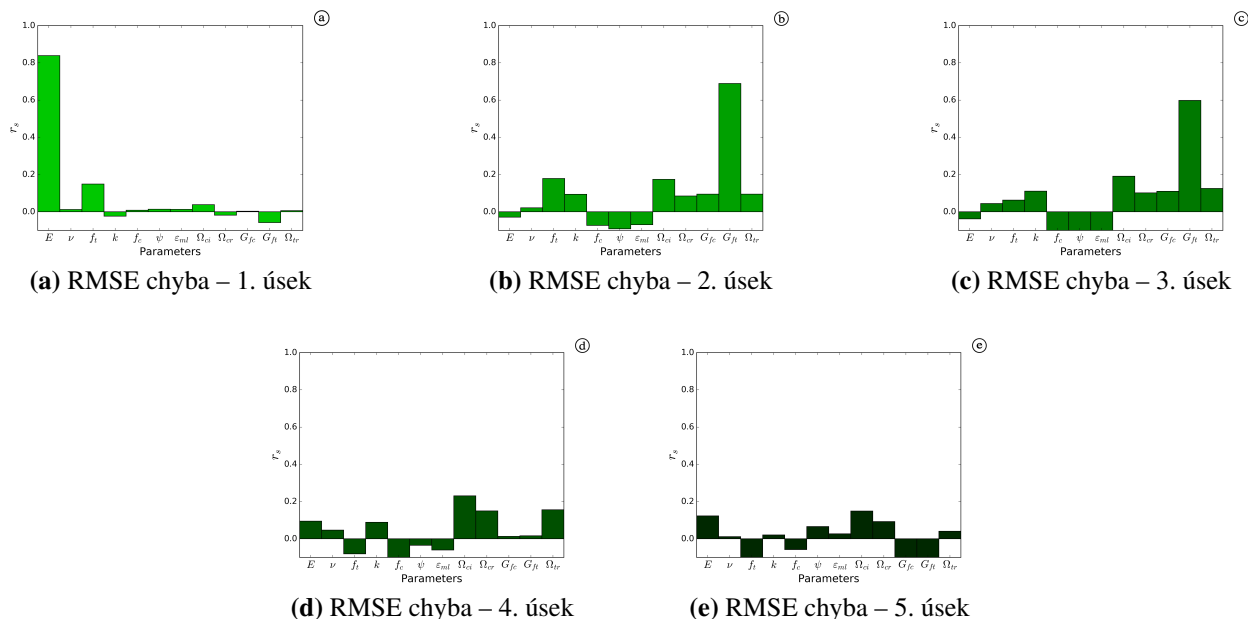


**Obrázek 6.3:** Graf citlivosti pro 5 úseků  $L - d$  křivky

S ohledem na znalosti výsledků analýzy citlivosti na úloze ohýbaného nosníku byl pro tahovou CT zkoušku proveden výpočet *Spearmanova koeficientu korelace*  $r_s$  také pro 5 úseků  $L - CMOD$  diagramu. Z výsledků těchto výpočtů, jejichž grafická podoba je uvedena na obrázcích 6.4a až 6.4e, vyplývá, že na podobu výsledné křivky má opět významný vliv jednoosá tahová pevnost  $f_t$  a modul pružnosti  $E_c$ . Výsledky na 3. a 4. úseku (obrázky 6.4c – 6.4d) navíc vykazovaly méně signifikantní vliv relativních reziduálních pevností  $\Omega_{ci}$ ,  $\Omega_{cr}$  a  $\Omega_{tr}$ .

Význam provedené modifikované analýzy citlivosti spočíval v možnosti použít jednoduché statistické metody jako nástroje pro pochopení chování libovolného materiálového modelu s větším množstvím vstupních parametrů. Vlastní identifikace hodnot materiálových parametrů byla vždy provedena přímou optimalizací pomocí genetického algoritmu, který je velmi robustní. S ohledem na výsledky analýzy citlivosti byla identifikace prováděna v redukovaném prostoru tří proměnných. Podoba redukovaného návrhového vektoru měla tedy tvar

$$\mathbf{X}_{red} = \{E_c; f_t; G_{ft}\}^T \quad (6.5)$$



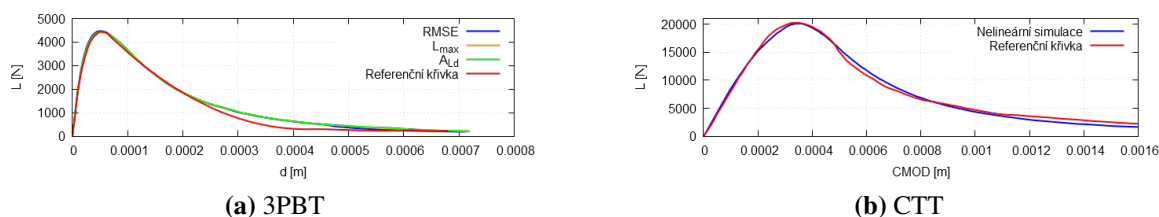
**Obrázek 6.4:** Graf citlivosti pro 5 úseků křivky  $L - CMOD$

## Výsledky identifikace

V rámci identifikační úlohy z ohybové zkoušky využívající RMSE chyby bylo vygenerováno celkem 76 návrhových vektorů, přičemž minima s hodnotou RMSE = 144,92 N bylo dosaženo v 33. iteraci. Identifikace materiálových parametrů při použití účelových funkcí definovaných jako rozdíly  $\Delta A_{Ld}$  a  $\Delta L_{max}$  ukázala na použitelnost uvedeného způsobu formulace účelové funkce, nicméně si vyžádala nejvíce výpočetního času. Při minimalizační variantě bylo minima s celkovou hodnotou RMSE = 143,13 N dosaženo při 85. iteraci z celkových 122 a ve druhé variantě bylo minima s celkovou hodnotou RMSE = 178,39 N dosaženo v 254. iteraci z celkového počtu 415 iterací. Porovnání výsledných  $L - d$  křivek lze pozorovat na obrázcích 6.5a a hodnoty identifikovaných parametrů shrnuje tabulka 6.1.

Vlastní proces identifikace byl i v případě tahového CT testu proveden s ohledem na výsledky analýzy citlivosti pro návrhový vektor  $\mathbf{X}_{red} = \{E_c; f_t; G_{ft}\}^T$ . Výše zmíněné reziduální pevnosti nebyly do identifikace zahrnuty, jelikož příslušné hodnoty korelačního koeficientu  $r_s$  nabývaly nižších hodnot než hodnota náležející jednoosé tahové pevnosti mající tuto hodnotu z veličin návrhového vektoru nejvyšší. Identifikace pomocí algoritmu MOGA byla provedena pro 20 generací populace s 50 jednicí v generaci. Výsledných hodnot materiálových charakteristik, odpovídajících globálnímu minimu s velikostí chyby RMSE = 549,39, bylo dosaženo v 93. realizaci návrhového vektoru. Porovnání výsledné a referenční  $L - CMOD$  je ilustrováno pomocí obrázku 6.5b.

Identifikované hodnoty materiálových parametrů z tahové zkoušky, které jsou



**Obrázek 6.5:** Kompletní srovnání výsledných  $L-d$  křivek pro GB po identifikaci alg. MOGA

**Tabulka 6.1:** Hodnoty materiálových parametrů identifikovaných pomocí alg. MOGA z 3PBT testu

Par.	Jednotka	RMSE	hledání $\Delta A_{Ld} = 0$	$\Delta L_{max} = 0$	$\min \{ \Delta A_{Ld}, \Delta L_{max} \}$
$E_c$	[GPa]	40,914		48,969	45,014
$f_t$	[MPa]	2,296		2,278	2,253
$G_{ft}$	[Nm/m <sup>2</sup> ]	49,654		49,564	50,056

přehledně shrnuty v tabulce 6.2, dosahovaly nižších hodnot než, jaké byly uvedeny původní publikaci [79]. Lze předpokládat, že rozdíl může způsoben vlastním materiálovým modelem, jelikož z vizuálního srovnání experimentální křivky a numerického výsledku lze usuzovat na korektní použití optimalizace. Prezentované výsledky identifikace parametrů modelu *Menetrey-Willam* na experimentálních datech z CT testu byly publikovány v rámci příspěvku na mezinárodní konferenci [30].

**Tabulka 6.2:** Hodnoty materiálových parametrů identifikovaných pomocí alg. MOGA z CT testu

Par.	Jednotka	RMSE
$E_c$	[GPa]	32,901
$f_t$	[MPa]	2,005
$G_{ft}$	[Nm/m <sup>2</sup> ]	68,206

### 6.1.2 Identifikace na modelu *Menetrey-Willam* použitím PSOA

V textu předcházející podkapitoly 6.1.1 byl na dvou studiích představen koncept identifikace parametrů materiálového modelu *Menetrey-Willam* pomocí optimalizačního algoritmu MOGA. Doložené výsledky prokázaly použitelnost postupu založeného na minimalizaci rozdílu mezi experimentální zatěžovací křivkou libovolného druhu a příslušným numericky získaným zatěžovacím diagramem. K minimalizaci bylo úspěšně využito optimalizačního algoritmu inspirovaného evolučními a genetickými procesy. V rámci dizertační práce byla s ohledem na potřeby řešení identifikace viskózních materiálových modelů betonu v systému *RFEM* provedena implementace algoritmu *Particle Swarm* (PSOA). Jedním z dílčích úkolů bylo ově-

řit použitelnost tohoto algoritmu na problému identifikace materiálových parametrů zopakováním identifikační studie na úloze ohybaného nosníku se zářezem.

Implementace algoritmu PSOA byla s ohledem na použití v širším okruhu úloh konstrukční optimalizace provedena tak, že návrhové proměnné mohou mít charakter spojitých a diskrétních proměnných s definovaným krokem. S ohledem na tuto speciální vlastnost, byla identifikace parametrů modelu *Menetrey-Willam* provedena pro oba tyto charakterystiky návrhových proměnných, přičemž vždy pro populaci částic o velikosti 100 a 50 s celkovým počtem 10 a 20 iterací.

### Vstupní data, výpočtový model, účelová funkce a analýza citlivosti

Vzhledem ke snaze verifikovat provedenou implementaci a zároveň použitelnost daného algoritmu v úlohách identifikace parametrů byla pro analýzu použita stejná vstupní data jako v případě analýzy pomocí software *ANSYS*. Jednalo se tedy o zatěžovací  $L - d$  křivku pocházející z tříbodového ohybového testu na betonovém nosníku o délce 360 mm, výšce 120 mm a šířce 56 mm, který byl v polovině rozpětí opatřen zářezem výšky 40 mm. Materiálově nelineární výpočet byl proveden na stejném rovinném výpočtovém modelu nosníku, řešeném jako rovinná napjatost. Minimalizován byl rozdíl mezi experimentální a numerickou  $L - d$  křivkou definovaný pomocí osvědčené RMSE chyby definované ve vztahu (6.1). Zohledněny byly také výsledky provedené analýzy citlivosti a identifikace byla provedena pouze pro redukovaný vektor signifikantních návrhových proměnných (6.5), který byl však s ohledem na použití vyšší verze knihovny materiálových modelů rozšířen o parametr reziduální tahové pevnosti  $\Omega_{tr}$ . Při testování novější verze knihovny bylo totiž zjištěno, že bez použití uvedeného parametru nebude možno získat dříve dosažené výsledky. Aktualizovaný redukovaný vektor návrhových proměnných měl tedy tvar

$$\mathbf{X}_{red} = \{E_c; f_t; G_{ft}; \Omega_{tr}\}^T \quad (6.6)$$

Hodnoty návrhových proměnných vektoru  $\mathbf{X}_{red}$  byly uvažovány pro následující intervaly:  $E \in \langle 30; 50 \rangle$  GPa;  $f_t \in \langle 2; 3 \rangle$  MPa,  $G_{ft} \in \langle 30; 90 \rangle$  GPa a  $\Omega_{tr} \in \langle 0, 01; 0, 05 \rangle$ . V případě diskrétního charakteru parametrů byl pro modul pružnosti uvažován krok o velikosti 5 GPa. Pro tahovou pevnost byl použit krok o velikosti 0,05 MPa. Lomová energie byla uvažována s krokem 1 Nm/m<sup>2</sup> a reziduální úroveň napětí v tahu s hodnotou 0,0005.

Hodnoty výsledků dosažených s pomocí algoritmu PSOA, prezentované v následujících podsekcích, jsou vztahovány k výsledkům dosaženým v rámci předešlé studie využívající algoritmu MOGA, protože není známo jednoznačně správné ře-



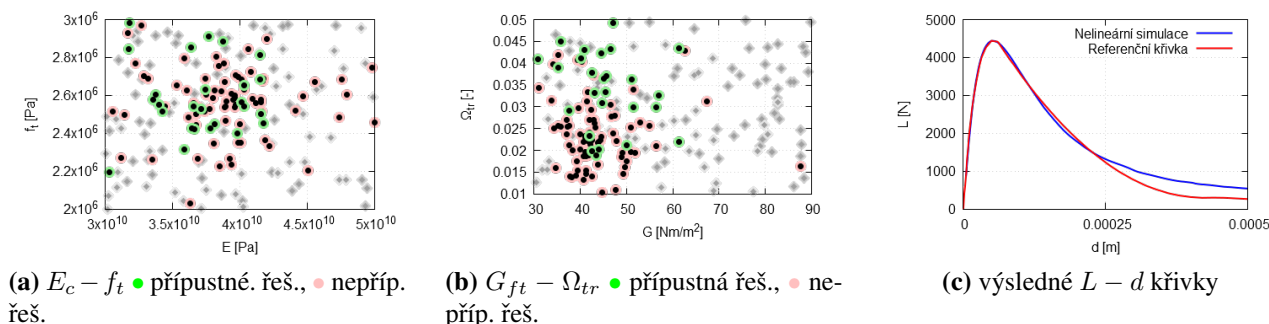
šení. Pro vyjádření úspěšnosti algoritmu je využíváno relativní hodnoty rozptylu  $\bar{\rho}$  částic poslední iterace od polohy globálního minima, který lze definovat takto

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{ij}}{n}, \quad \rho_{ij} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} (\delta_{ij})^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m-1} \left( \frac{X_{ij}}{X_{GB}} - 1 \right)^2} \quad (6.7)$$

kde  $n$  je počet přípustných řešení a  $m$  je počet návrhových proměnných v  $\mathbf{X}_{red}$ . Do charakteristiky není zahrnut parametr  $\Omega_{tr}$ .

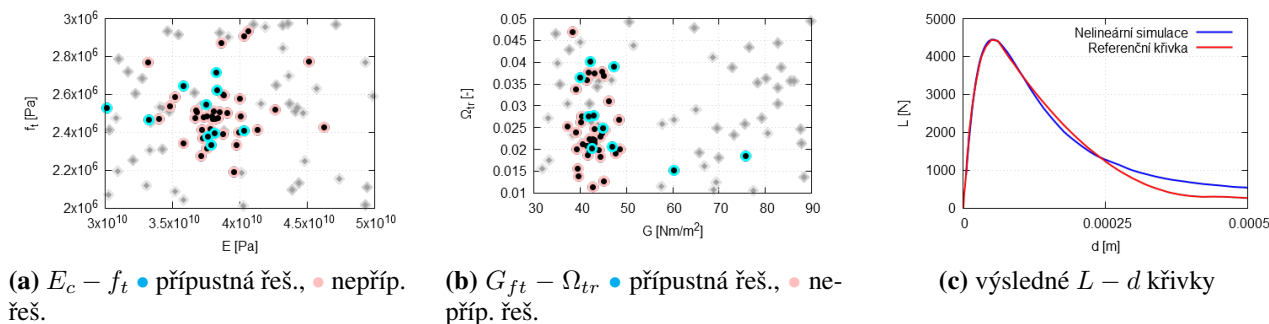
## Výsledky identifikace – spojitý charakter parametrů

Při spojitěm charakteru parametrů bylo globálního minima pro populaci o velikosti 100 částic dosaženo v poslední 10. iteraci s relativním rozptylem  $\bar{\rho} = 0,23923$  a výslednou hodnotou chyby  $RMSE = 164,16659$ . Grafické znázornění výsledků v podobě srovnání polohy částic v 1. a 10. iteraci a porovnání experimentální a numerické  $L - d$  křivky je znázorněno na obrázcích 6.6a – 6.6c.



**Obrázek 6.6:** Vývoj populace při identifikaci  $E$  a  $f_t$  pomocí alg. PSOA (par.:  $\mathbf{X}^c$ , it.: 10, pop.: 100)

V případě poloviční velikosti populace částic bylo minima dosaženo v 18. iteraci, přičemž relativní rozptyl dosáhl velikosti  $\bar{\rho} = 0,24310$  a výsledná chyba  $RMSE$  nabyla hodnoty 160,39137.



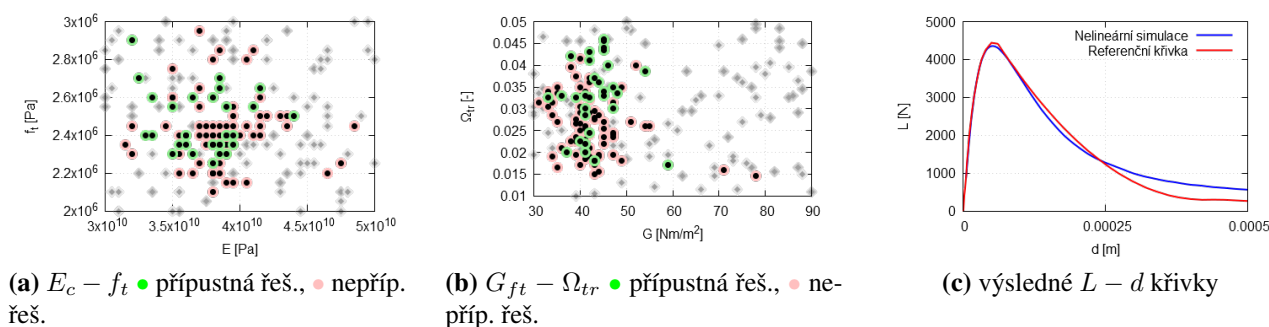
**Obrázek 6.7:** Vývoj populace při identifikaci  $E$  a  $f_t$  pomocí alg. PSOA (par.:  $\mathbf{X}^c$ , it.: 20, pop.: 50)

Nalezení lepší varianty v případě poloviční velikosti populace potvrzuje závěry o lepší konvergenci při upřednostnění zvyšování počtu iterací před zvětšováním velikosti populace, nicméně hodnota relativního rozptylu přípustných řešení byla vyšší. Uvažuje-li se však hodnota relativního rozptylu částic všech řešení v poslední iteraci, pak je v případě populace o velikosti 50 částic hodnota rovna  $\bar{\rho}_{all} = 0,20870$  a pro populaci o 100 částicích rovna  $\bar{\rho}_{all} = 0,24653$ . Grafické vyjádření výsledků formou grafů poloh částic v 1. a 20. iteraci a srovnání  $L - d$  křivky pro návrhový vektor nalezeného minima se vzorovou křivkou je uvedeno na obrázcích 6.7a – 6.7c.

## Výsledky identifikace – diskrétní charakter parametrů

Analýza inverzní identifikace s uvažováním diskrétního charakteru parametrů byla provedena s cílem prokázat realizovatelnost této úlohy při uvažování předem definované množiny realizací návrhových proměnných. Při tomto charakteru parametrů dochází na jedné straně k redukci počtu možných variant a zdánlivému zjednodušení úlohy, ale na straně druhé lze očekávat snížení přesnosti vlivem voleného kroku jednotlivých návrhových proměnných.

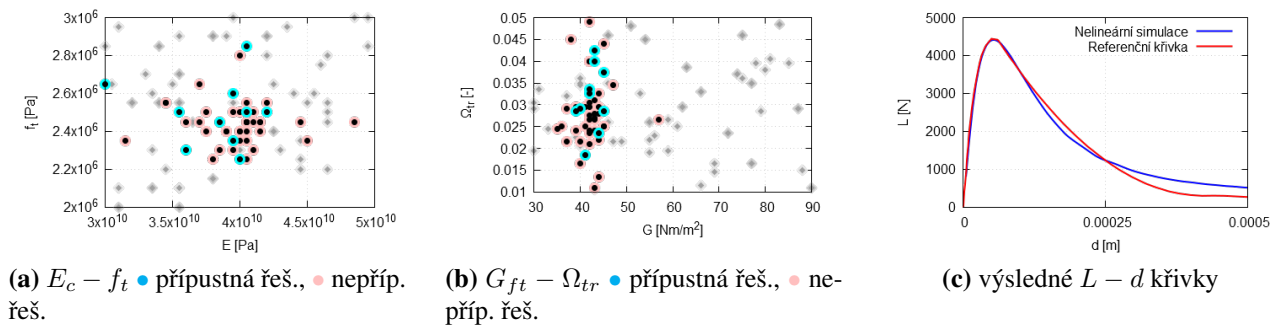
Dosažené výsledky vykazovaly, stejně jako v případě spojitého charakteru parametrů, zlepšení při hledání minima pro poloviční variantu populace, přičemž příslušný relativní rozptyl částic přípustných řešení resp. všech řešení v poslední iteraci nabylo velikosti  $\bar{\rho} = 0,20246$  resp.  $\bar{\rho}_{all} = 0,19172$ . Hodnota účelové funkce nalezeného minima měla hodnotu 170,2131. V případě plné velikosti populace byla hodnota účelové funkce  $RMSE = 172,38902$  a příslušné rozptyly částic přípustných a všech řešení v poslední iteraci byly  $\bar{\rho} = 0,20892$  a  $\bar{\rho}_{all} = 0,22100$ .



**Obrázek 6.8:** Vývoj populace při identifikaci  $E$  a  $f_t$  pomocí alg. PSOA (par.:  $X^d$ , it.: 10, pop.: 100)

Srovnání poloh částic v první a poslední iteraci pro populaci o velikosti 100 resp. 50 je dokumentováno pomocí obrázků 6.8a – 6.8b resp. 6.9a – 6.9b a grafické porovnání  $L - d$  křivek pro dosažená minima s původní experimentální křivkou je zobrazeno na obrázcích 6.8c a 6.9c.





**Obrázek 6.9:** Vývoj populace při identifikaci  $E$  a  $f_t$  pomocí alg. PSOA (par.:  $X^d$ , it.: 20, pop.: 50)

Celková sumarizace výsledků včetně srovnání vůči hodnotám získaným při identifikaci pomocí alg. MOGA v systému ANSYS jsou uvedeny v tabulce 6.3.

**Tabulka 6.3:** Hodnoty materiálových identifikovaných pomocí alg. PSOA z 3PBT testu

char. par.	nastavení	$X_{red}$	$ \Delta x  [-]$	$ \delta x  [%]$	RMSE [N]	$ \Delta f  [-]$	$ \delta f  [%]$
$X^c$	pop.: 100, it.: 10	$38,126 \cdot 10^9$ $2,448 \cdot 10^6$ 43,385 0,01882	$2,788 \cdot 10^9$ $0,152 \cdot 10^6$ 6,269 —	6,813 6,615 12,626 —	164,16659	21,037	14,698
$X^c$	pop.: 50, it.: 20	$37,919 \cdot 10^9$ $2,472 \cdot 10^6$ 42,211 0,02072	$2,995 \cdot 10^9$ $0,176 \cdot 10^6$ 7,443 —	7,321 7,678 14,990 —	160,39137	17,261	12,060
$X^d$	pop.: 100, it.: 10	$38,000 \cdot 10^9$ $2,400 \cdot 10^6$ 42,000 0,0270	$2,914 \cdot 10^9$ $0,104 \cdot 10^6$ 7,654 —	7,122 4,530 15,415 —	172,38902	29,25902	20,442
$X^d$	pop.: 50, it.: 20	$35,500 \cdot 10^9$ $2,500 \cdot 10^6$ 41,000 0,0185	$5,414 \cdot 10^9$ $0,204 \cdot 10^6$ 8,654 —	13,233 8,885 17,429 —	170,2131	27,0831	18,922

Výsledky uvedené na předcházejících stranách ukazují, že s implementovaným algoritmem PSOA bylo dosaženo výsledků podobné přesnosti jako při použití algoritmů dostupných v komerčních softwarových nástrojích. Maximální odchylka byla zaznamenána v případě diskrétního charakteru návrhových proměnných a při použití plné populace o velikosti 100 částic, přičemž hodnota této odchylky dosáhla 20,442%. Důvodem uvedeného rozdílu je použití diskrétních parametrů, přičemž snížením velikosti kroku by mělo docházet ke zpřesňování a přiblížení k řešení se spojitými parametry. Dále lze odchylku připsat použití novější verze materiálové knihovny, jelikož jak lze pozorovat na srovnání obrázků 6.6c, 6.7c, 6.8c a 6.9c, ani v jednom případě nebylo možné dosáhnout zarovnání konců  $L - d$  diagramů. Hodnoty odchylek jednotlivých parametrů ukazují, že nalezená řešení se nachází blízko

globálního minima.

Prokázána je tímto použitelnost optimalizačních technik založených na napodobování chování početných populací živočichů na problematiku zpětné identifikace parametrů komplexního materiálového modelu z experimentálních dat. Vzhledem k množství nepřijatelných řešení odpovídajících nekonvergujícím řešením vykázal algoritmus vysokou míru robustnosti, která byla ovšem vykoupena dosažením minima nižší avšak přijatelné přesnosti.

### 6.1.3 Identifikace parametrů *Kelvinova řetězce*

Metoda zpětné identifikace parametrů byla aplikována také na viskózní reologický model *Kelvinova řetězce*<sup>1</sup>. Tento materiálový model byl implementován do systému *RFEM* pro simulace dotvarování betonu tak, že vyžaduje definici celkem 14 parametrů. Příslušná *Dirichletova* řada aproximující funkci dotvarování má tedy tvar

$$\varphi(t) = \left[ E_0 + \sum_{j=1}^7 \alpha_j \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Gamma_j}} \right) \right], \quad (6.8)$$

kde  $E_0$  je modul pružnosti betonu,  $\alpha_j = E_j$  a  $\Gamma_j = E_j/\eta_j$

Z pohledu praktického použití není přímá definice vstupních parametrů uživatelem realizovatelná, přestože jsou dvojice  $E_j$  a  $\eta_j$  fyzikálně reprezentovatelné jako tuhosti a viskozity jednotlivých článků řetězce, jediná dostupná charakteristika v normativním předpisu [68] je křivka dotvarování (průběh součinitele dotvarování  $\varphi$  v čase  $t$ ).

BAŽANT a kol. v [3] prokázali pro identifikaci koeficientů řady z experimentálních dat použití metody nejmenších čtverců, přičemž volbu retardačních časů  $\Gamma_j$  vyskytujících se v exponentech členů řady volili empiricky tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné pokrytí časové osy v logaritmickém měřítku. Kompletní identifikace všech parametrů lze však také určit jako kořeny polynomu, jehož koeficienty jsou determinanty matic získaných z hodnot aproximované funkce dotvarování a jejich derivací dle [54]. Problém hledání předem neznámých hodnot parametrů řady lze formulovat také jako optimalizační úlohu. Toto řešení je popsáno v pracích [12, 59]. Tito autoři řešili identifikační problém jako nelineární optimalizační úlohu. Vzhledem k aktuální výkonnosti běžně dostupných počítačových sestav lze optimalizaci řešit ve velmi krátkém čase i hrubou silou pomocí algoritmu PSOA. Přestože autoři [1, 3] považují za dostatečně přesné použití metody nejmenších čtverců. Tato

---

<sup>1</sup>V anglicky psané literatuře se používá pojem *General Kelvin Chain* a proto bude v dalších částech textu práce využívána zkratka **GKCH**.

metoda však vyžaduje odhad retardačních časů. Použití optimalizačního algoritmu lze tedy považovat za jejich zpřesnění. Pomocí optimalizace lze důkladněji prohledat prostor návrhových proměnných a najít odpovídající dvojice  $E_j$  a  $\eta_j$ , které lépe vystihují zadanou funkci poddajnosti.

Navržená kombinace metody nejmenších čtverců byla testována na dvou sadách studií lišících se použitou účelovou funkcí. V rámci první sady testovacích studií byla uvažována účelová funkce formulovaná jako RMSE chyba dle vztahu (6.1) a v rámci druhé sady byla účelová funkce definována jako  $L_1$  norma následujícím vztahem

$$L_1 = \sum_{i=1}^n |y_i^* - y_i|, \quad (6.9)$$

kde  $y_i^*$  je hodnota součinitele dotvarování  $\varphi$  určená pomocí *Dirichletovy* řady a  $y_i$  je hodnota součinitele  $\varphi$  z normové křivky dotvarování a  $n$  je počet bodů křivky. V rámci každé ze zmiňovaných studií byl dále analyzován vliv velikosti populace a počtu iterací na přesnost a byl zkoumán vliv striktní penalizace částic při opuštění předem stanových intervalů hledaných parametrů. Hranice těchto intervalů byly v rámci algoritmu stanoveny jako 0,9 a 1,1 násobek hodnoty parametru získaného metodou nejmenších čtverců ve variantě bez penalizace, resp. 0,75 a 1,25 násobek ve variantě se striktní penalizací. Při překročení hranic intervalu byla v této variantě automaticky hodnota účelové funkce nastavena na hodnotu  $+\infty$  a rychlost částice na hodnotu 0,0. Značení jednotlivých studií a použitá nastavení shrnuje dále uvedená tabulka 6.4.

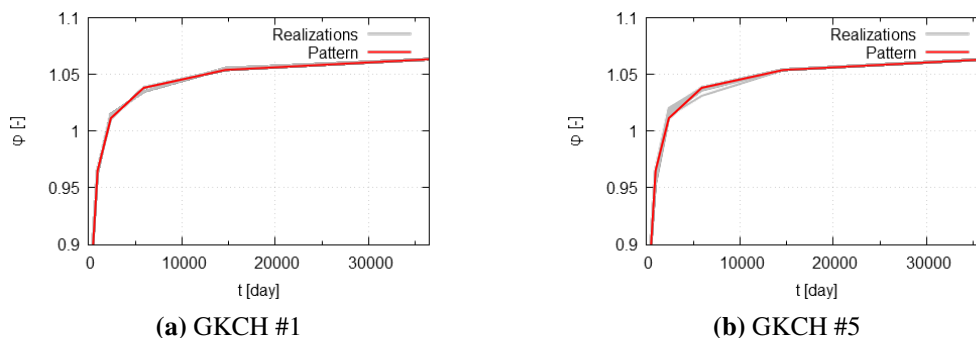
**Tabulka 6.4:** Přehled provedených studií včetně příslušných nastavení

	Účelová funkce $f$	Penalizace	Populace (ne $\circ$ , ano $\bullet$ )	Počet iterací		Účelová funkce $f$	Penalizace	Populace (ne $\circ$ , ano $\bullet$ )	Počet iterací
#0	RMSE	$\circ$	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$	1000	#4	$L_1$	$\circ$	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$	1000
#1	RMSE	$\circ$	100	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$	#5	$L_1$	$\circ$	100	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$
#2	RMSE	$\bullet$	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$	1000	#6	$L_1$	$\bullet$	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$	1000
#3	RMSE	$\bullet$	100	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$	#7	$L_1$	$\bullet$	100	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^5$

## Výsledky identifikace

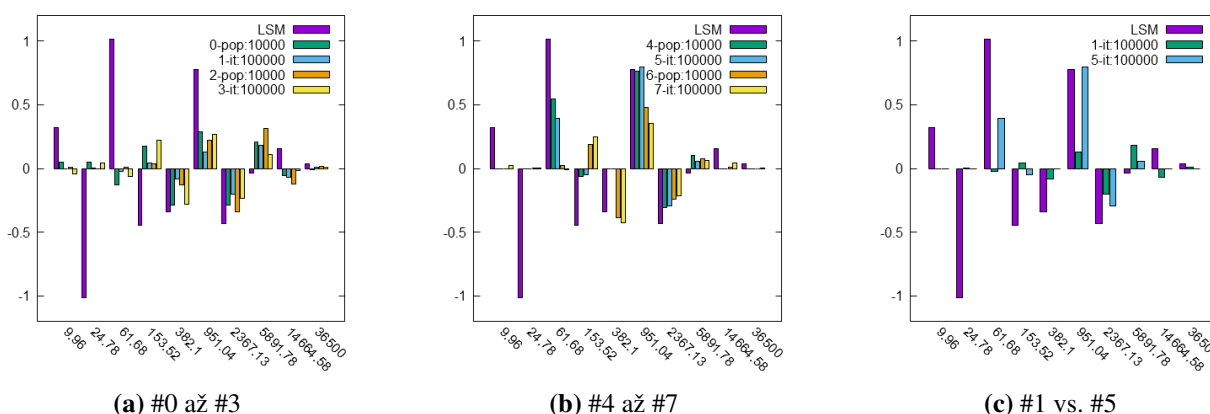
Všechny dosažené výsledky prokázaly účinnost použité metody identifikace parametrů, kdy ve všech případech došlo pomocí PSOA ke zpřesnění. Uvedené tvrzení lze dokumentovat průběhy součinitele dotvarování v čase na obrázcích 6.10a a 6.10b, pocházejících ze studií GKCH #1 a GKCH #5, v rámci nichž došlo k nej-

většímu zlepšení vůči odhadu pomocí metody nejmenších čtverců a tedy k dosažení nižší hodnoty účelové funkce. Příslušné hodnoty lze dohledat v tabulce 6.5.



**Obrázek 6.10:** Detail srovnání nejlepších  $\varphi - t$  křivek

V rámci těchto studií bylo využito maximálního počtu iterací, což poukazuje na charakteristickou vlastnost algoritmu PSOA, který lépe konverguje při zvyšování počtu iterací než při zvětšování velikosti populace částic. Porovnání výsledků s ohledem na použitou účelovou funkci lze provést pomocí grafů na obrázcích 6.11a – 6.11b. Na zmíněných grafech lze v detailu pozorovat odchylky výsledné křivky dotvarování a křivky odpovídající odhadu pomocí metody nejmenších čtverců ve významných časových uzlech od zadané normové křivky, přičemž lze konstatovat, že lepších výsledků lze dosáhnout při použití účelové funkce definované pomocí RMSE chyby. Grafy na obrázku 6.11c srovnávající nejlepší výsledky dosažené v rámci jednotlivých sad studií uvedenou skutečnost ratifikují.



**Obrázek 6.11:** Srovnání provedených studií GKCH

Ze všech výsledků je patrné, že použitá metoda vykazuje problémy s nalezením optimálních hodnot parametrů ovlivňujících podobu střední části křivky. V této části dochází s ohledem na nízký sklon k oscilacím, což je zřejmě důsledek existence většího množství lokálních minim.

**Tabulka 6.5:** Dosažené výsledky identifikace parametrů modelu GKCH algoritmem PSOA

Studie	Typ účelové funkce $f$	$f^{LSM} [-] \cdot 10^{-3}$	$f_{avg}^{PSOA} [-]$	$\delta$ [%]	poměr $r$ [-]
#1	RMSE	4,05997	2,52388	37,84	2,44
			1,64329	59,52	1,59
			1,03238	74,57	1,00
#5	$L_1$	33,00641	17,03653	48,38	1,35
			13,69066	58,52	1,09
			12,57318	61,69	1,00

Z dosažených výsledků lze považovat aplikaci metody identifikace hodnot parametrů *Kelvinova řetězce* pomocí optimalizace algoritmem PSOA za korektní a použitelné jako zpřesnění odhadu metodou nejmenších čtverců (MNČ). Jako slabinu použitého řešení lze považovat právě počáteční odhad MNČ, který je závislý na empirické volbě retardačních časů  $\Gamma_j$ . Lze totiž předpokládat existenci takové křivky dotvarování, pro níž budou nevhodnou volbou retardačních časů odhadnuty špatné startovací hodnoty parametrů pro běh optimalizačního algoritmu.

## 7 ZÁVĚR

Dílčím cílem práce bylo nasazení metod optimalizace na identifikaci parametrů materiálových modelů stavebních materiálů používaných při numerických simulacích statických úloh. Tento dílčí cíl byl realizován s použitím genetického algoritmu MOGA v systému ANSYS, kdy byly identifikovány parametry elastoplastického materiálového modelu betonu *Menetrey-Willam* z databáze *multiPlas*. Pro ověření metody byly provedeny celkem 2 dílčí studie, přičemž v rámci první bylo využito experimentálních dat z experimentu v tříbodovém ohybu a v druhé studii bylo využito publikovaných dat z tahových zkoušek označovaných *Compact Tension Test* (CTT). V obou případech se dosáhlo výborných výsledků, což bylo považováno za výchozí předpoklad k implementaci vlastního algoritmu pro potřeby identifikace parametrů *Kelvinova reologického řetězce* z křivky dotvarování pro program *RFEM*.

Dosažení hlavního cíle bylo realizováno prostřednictvím implementace optimalizačního algoritmu *Particle Swarm* a jeho nasazením na problém identifikace parametrů dvou materiálových modelů betonu. Pomocí uvedeného algoritmu využívajícího kombinaci principů kognitivního a sociálního učení byla nejprve zopakována analýza na elastoplastickém modelu *Menetrey-Willam*, přičemž bylo dosaženo srovnatelných výsledků jako při použití genetického algoritmu. Za hlavní výsledek vyjadřující splnění cíle lze považovat úspěšné využití naprogramovaného řešení pro

zpřesnění odhadu tuhostí a viskozit v *Kelvinově řetězci* z předem známé křivky dotvarování. Navržený postup využívající implementovaného algoritmu umožňuje výrazné zpřesnění hledaných hodnot parametrů řetězce a v konečném důsledku zpřesnění výpočtu odezvy řešené konstrukce. Jako nevýhodu popsaného postupu lze označit oscilaci výsledků při opakovaném výpočtu, což je však přirozený důsledek použité metody využívající náhodné inicializace. Odstranění uvedeného negativa lze docílit pomocí kombinace navýšení počtu částic populace a iterací algoritmu, což bohužel vede ke zvýšení nároků na čas. Aktuální implementace však byla provedena bez použití paralelizace výkonného kódu a tak existuje reálný potenciál ke zpřesnění bez negativního dopadu na délku výpočtu. Použití paralelních cyklů uvnitř algoritmu je předmět budoucího vývoje, který je nutnou podmínkou pro konkurenceschopnost.

Programování bylo provedeno v takové míře obecnosti, aby výsledný produkt byl vedle identifikace použitelný i pro klasickou konstrukční optimalizaci dimenzí a tvaru konstrukce. Uvedeného cíle bylo dosaženo a v aktuální nové verzi *RFEM 6*, která umožňuje provádění konstrukčních optimalizací je naprogramované knihovny včetně jejich algoritmů plně využíváno.

## LITERATURA

- [1] BAŽANT, Z., P. a JIRÁSEK, M. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures: Fundamentals of Linear Viscoelasticity*, **225**, s. 9–28. Springer: Dordrecht, Netherlands, 2018. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001741.
- [2] BAŽANT, Z. P. a OH, B. H. Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions*. 1983, **16**(3), s. 155–177. ISSN 0025-5432. DOI: 10.1007/BF02486267.
- [3] BAŽANT, Z. P. a WU, S. T. Dirichlet Series Creep Function for Aging Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1973, **99**(2), s. 367–387. ISSN 0044-7951. DOI: 10.1061/JMCEA3.0001741.
- [4] BATHE, K.-J. *Finite Element Procedures*. 2 vydání, 2016. ISBN 978-0-9790049-5-7.
- [5] BELYTSCHKO, T. a BLACK, T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1999, **45**(5), s. 601–620. ISSN 1097-0207. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0207(19990620)45:5<601::AID-NME598>3.0.CO;2-S.
- [6] BRAASCH, H. a ESTRIN, Y. *Parameter identification for a two-internal variable constitutive model using the evolution strategy*, MD43 and AMD 168, s. 47–56. ASME Press, 1993.
- [7] CHRISTENSEN, P. W. a KLARBRING, A. *An introduction to structural optimization*. Springer, 2009. ISBN 978-1-4020-8666-3.
- [8] CICEKLI, U., VOYIADJIS, G. Z. a AL-RUB, R. K. A. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. *International Journal of Plasticity*. 2007, **23**(10-11), s. 1874–1900. ISSN 07496419. DOI: 10.1016/j.ijplas.2007.03.006.
- [9] CUNDALL, P. A. Formulation of a three-dimensional distinct element model—Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1988, **25**(3), s. 107–116. ISSN 01489062. DOI: 10.1016/0148-9062(88)92293-0.
- [10] DAUX, Ch., MOES, N., DOLBOW, J., SUKUMAR, N. a BELYTSCHKO, T. Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2000, **48**(12), s. 1741–1760. ISSN 1097-0207. DOI: 10.1002/1097-0207(20000830)48:12<1741::AID-NME956>3.0.CO;2-L.

- [11] DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S. a MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2002, **6**(2), s. 182–197. DOI: 10.1109/4235.996017.
- [12] DISTEFANO, N. On the Identification Problem in Linear Viscoelasticity. In *ZAMM*, **50**, s. 683–690, 1970.
- [13] DYNARDO GmbH. Multiplas – User’s Manual Release 5.1.0 for 15.0. 2014.
- [14] EBERHART, R. a KENNEDY, J. A new optimizer using particle swarm theory. In *MHS’95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, s. 39–43, 1995. DOI: 10.1109/MHS.1995.494215.
- [15] FAIRBAIRN, E. M. R., PAZ, C. N. M., EBECKEN, N. F. F. a ULM, F.-J. Use of neural networks for fitting of FE probabilistic scaling model parameters. *International Journal of Fracture*. 1999, **95**(1/4), s. 315–324. ISSN 03769429. DOI: 10.1023/A:1018677023642.
- [16] FENG, X.-T., CHEN, B.-R., YANG, Ch., ZHOU, H. a DING, X. Identification of visco-elastic models for rocks using genetic programming coupled with the modified particle swarm optimization algorithm. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006, **43**(5), s. 789–801. ISSN 13651609. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.12.010.
- [17] FU, R., XU, H., WANG, Z., SHEN, L., CAO, M. TONGWEI, L. a NOVÁK, D. Enhanced Intelligent Identification of Concrete Cracks Using Multi-Layered Image Preprocessing-Aided Convolutional Neural Networks. *Sensors*. 2020, **20**(7). ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s20072021.
- [18] GAVRUS, A., ASSONI, E. a CHENOT, J. L. An inverse analysis using a finite element model for identification of rheological parameters. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, **60**(1-4), s. 447–454. ISSN 0924-0136. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02369-2](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(96)02369-2). Proceedings of the 6th International Conference on Metal Forming.
- [19] GHABOUSSI, J. a BARBOSA, R. Three-dimensional discrete element method for granular materials. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1990, **14**(7), s. 451–472. ISSN 1096-9853. DOI: 10.1002/nag.1610140702.
- [20] GRASSL, P. a JIRÁSEK, M. Damage-plastic model for concrete failure. *International Journal of Solids and Structures*. 2006, **43**(22-23), s. 7166–7196. ISSN 00207683. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032.
- [21] HIMMELBLAU, D. *Applied Nonlinear Programming*. McGraw-Hill, Inc., 1 vydání, 1972. ISBN 978-0070289215.
- [22] HOKEŠ, F. The Current State-of-the-Art in the Field of Material Models of Concrete and other Cementitious Composites. In *Applied Mechanics and Materials*, **729**, s. 134–139, 2015. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.729.134. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.729.134>.
- [23] HOKEŠ, F. Vliv redukce počtu návrhových parametrů při inverzní identifikaci parametrů nelineárních materiálových modelů s pomocí optimalizačních algoritmů. In *Proceedings of 13th International Conference of New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*, Bratislava, 2015. Slovak University of Technology in Bratislava. ISBN 978-80-227-4463-8.
- [24] HOKEŠ, F. Comparison of suitability of selected material models of concrete for inverse identification of parameters with the aid of optimization algorithms. In *31st conference with international participation Computational Mechanics 2015*, s. 1–2, Plzeň, 2015. University of West Bohemia. ISBN 978-80-261-0568-8.
- [25] HOKEŠ, F. Selected Aspects Of Modelling Of Non-Linear Behaviour Of Concrete During Tensile Test Using Multiplas Library. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2015, **15**(2). ISSN 1804-4824. DOI: 10.1515/tvsb-2015-0009. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/tvsb.2015.15.issue-2/tvsb-2015-0009/tvsb-2015-0009.xml>.
- [26] HOKEŠ, F., HUŠEK, M., KRÁL, P. a KALA, J. Numerical Simulation of Reinforced Concrete Beam with Utilization of Elasto-plastic Material Model of Concrete. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2016, **11**, s. 136–141. ISSN 1991-8747.
- [27] HOKEŠ F., KALA, J. a KRŇÁVEK, O. Optimization as a Tool for the Inverse Identification of Parameters of Nonlinear Material Models. In *Proceedings of the 9th International Conference on Continuum Mechanics (CM ’15)*, s. 50–55, Rome, 2015. WSEAS Press. ISBN 978-1-61804-346-7.
- [28] HOKEŠ F., KALA, J. a KRŇÁVEK, O. Nonlinear numerical simulation of fracture test with use of optimization for identification of material parameters. *International Journal of Mechanics*. 2016, **10**, s. 159–166. ISSN 1998-448.
- [29] HOKEŠ, F., KALA, J., HUŠEK, M. a KRÁL, P. Parameter Identification for a Multivariable Nonlinear Constitutive Model inside ANSYS Workbench. *Procedia Engineering*. 2016, **161**, s. 892–897. ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.743. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816329721>.
- [30] HOKEŠ F., KRÁL, P., HUŠEK, M. a KALA, J. Study on Identification of Material Model Parameters from Compact Tension Test on Concrete Specimens. **245**(3), 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/245/3/032079. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/3/032079>.
- [31] HOKEŠ, F., KRÁL, P., KRŇÁVEK, O. a HUŠEK, M. Improved Sensitivity Analysis in the Inverse Identification of

- the Parameters of a Nonlinear Material Model. In *Modern Building Materials, Structures and Techniques MBMST 2016*, Lithuania, 2016.
- [32] HOLLAND, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Bradford Books, reprint vydání, 1992. ISBN 978-0262581110.
- [33] HYNDMAN, R. J. a KOEHLER, A. B. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*. 2006, **22**(4), s. 679–688. DOI: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.
- [34] JAVADI, A. A., FARMANI, R., TOROPOV, V. V. a SNEE, C. P. M. Identification of parameters for air permeability of shotcrete tunnel lining using a genetic algorithm. *Computers and Geotechnics*. 1999, **25**(1), s. 1–24. ISSN 0266352X. DOI: 10.1016/S0266-352X(99)00014-2.
- [35] JIN, Y.-F., YIN, Z.-Y., SHEN S.-L. a ZHANG D.-M. A new hybrid real-coded genetic algorithm and its application to parameters identification of soils. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2017-09-02, **25**(9), s. 1343–1366. ISSN 1741-5977. DOI: 10.1080/17415977.2016.1259315.
- [36] KARMARKAR, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming. *Combinatorica*. 1984, **4**(4), s. 373–395. ISSN 0209-9683. DOI: 10.1007/BF02579150.
- [37] KENNEDY, J. a EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, **4**, s. 1942–1948, 1995. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [38] KLISINSKY, M. *Degradation and plastic deformation of concrete*. Polish Academy of Sciences, 1985.
- [39] KOCHENDERFER, M. J. a WHEELER, T. A. *Algorithms for optimization*. The MIT Press, 2019. ISBN 978-026-2039-420.
- [40] KRÁL, P., HRADIL, P. a KALA, J. Four-Point Bending Test on a High Reinforced Concrete Beam: Nonlinear Numerical Analysis Using Material Parameter Identification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, **471**, s. 052052. DOI: 10.1088/1757-899x/471/5/052052.
- [41] KRÁL, P., HRADIL, P., HUŠEK M., KALA, J. a KALA, Z. Sensitivity analysis and optimization as tools for the inverse concrete material model parameter identification. *AIP Conference Proceedings*. 2018, **1978**(1), s. 430010. DOI: 10.1063/1.5044025.
- [42] KYAW, S. T., ROUSE, J. P. LU, J. a SUN, W. Determination of material parameters for a unified viscoplasticity-damage model for a P91 power plant steel. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016, **115-116**, s. 168–179. ISSN 00207403. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.06.014.
- [43] LEHKÝ, D. a NOVÁK, D. Solving Inverse Structural Reliability Problem Using Artificial Neural Networks and Small-Sample Simulation. *Advances in Structural Engineering*. 2012, **15**(11), s. 1911–1920. ISSN 1369-4332. DOI: 10.1260/1369-4332.15.11.1911.
- [44] LEHKÝ, D., LIPOWCZAN, M., ŠIMONOVÁ, H. a KERŠNER, Z. A hybrid artificial neural network-based identification system for fine-grained composites. *Computers and Concrete*. 2021, **28**(4), s. 369–378. ISSN 1598-818X. DOI: 10.12989/cac.2021.28.4.369.
- [45] LEHKÝ, D., ŠOMODÍKOVÁ, M. a NOVÁK, D. Inverzní spolehlivostní analýza mostu z MPD nosníků: identifikace parametrů. *Beton - TKS*. 2016, **2016**(6), s. 58–61. ISSN 1213-3116.
- [46] LEPŠ, M. *Single and Multi-Objective Optimization in Civil Engineering with Applications*. Dizertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2004.
- [47] MAŇAS, M. *Optimalizační metody*. SNTL, 1 vydání, 1979.
- [48] MAHNKEN, R. a STEIN, E. A unified approach for parameter identification of inelastic material models in the frame of the finite element method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1996, **136**(3), s. 225–258. ISSN 0045-7825. DOI: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(96\)00991-7](https://doi.org/10.1016/0045-7825(96)00991-7).
- [49] MARKIEWICZ, E. a LANGRAND, B. Characterisation and Parameters Identification of Materials Constitutive and Damage Models. *Procedia Engineering*. 2017, **173**, s. 33–40. ISSN 18777058. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.016.
- [50] MEIER, J., SCHAEGLER, W., BORGATTI, L., CORSINI, A. a SCHANZ, T. Inverse Parameter Identification Technique Using PSO Algorithm Applied to Geotechnical Modeling. *Journal of Artificial Evolution and Applications*. 2008-05-04, **2008**, s. 1–14. ISSN 1687-6229. DOI: 10.1155/2008/574613.
- [51] MENETREY, P. *Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, 1994.
- [52] MENETREY, P. a WILLAM, K. J. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. 1995, **92**(3), s. 311–318.
- [53] MOES, N., DOLBOW, J. a BELYTSCHKO, T. A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1999, **46**(1), s. 131–150. ISSN 1097-0207. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0207(19990910)46:1<131::AID-NME726>3.0.CO;2-J.
- [54] MOLL, I., NAVRÁTIL, J. a ŽÁK, J. Výpočet exponentů při aproximaci funkce součtem exponenciál. In *Knižnice algoritmov XI., Proceedings of Sympózium Algoritmy '91, 15.-19.4.1991*, s. 11–16, Štrbské pleso, Slovensko, 1991. JSMF SAV: Bratislava. DOI: 10.1007/978-94-024-1138-6\_2.



- [55] NELDER, J. A. a MEAD, R. A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*. 1965-01-01, 7(4), s. 308–313. ISSN 0010-4620. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308.
- [56] NĚMEC, I. a kol. *Finite element analysis of structures – principles and praxis*. Shaker, 1. vydání, 2010. ISBN 978-383-2293-147.
- [57] NĚMEC, I., TRCALA, M. a REK, V. *Nelineární mechanika*. Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2018. ISBN 978-80-214-5519-1.
- [58] NOVÁK, D. a LEHKÝ, D. ANN inverse analysis based on stochastic small-sample training set simulation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2006, 19(7), s. 731–740. ISSN 09521976. DOI: 10.1016/j.engappai.2006.05.003.
- [59] PISTER, K., S. Mathematical Modeling for Structural Analysis and Design. In *Nuclear Engineering & Design*, 18, s. 353–375, 1972.
- [60] PLANAS, J., GUINEA, G. V. a ELICES, M. Size effect and inverse analysis in concrete fracture. *International Journal of Fracture*. 1999, 95(1/4), s. 367–378. ISSN 03769429. DOI: 10.1023/A:1018681124551.
- [61] PÖLLING, R. *Eine praxisnahe, schadigungsorientierten Materialbeschreibung von Stahlbeton für Strukturanalysen*. PhD thesis, Ruhr-Universität, Bochum, 2000.
- [62] RAO, S. S. *Engineering optimization*. John Wiley, 4th ed vydání, 2009. ISBN 978-0-470-18352-6.
- [63] ROJAS, C. J. G., BITTERN COURT, M. L. a BOLDRINI, J. L. Parameter identification for a damage model using a physics informed neural network. 2021, s. 1–31.
- [64] ROMMEL, G. R. a SHOEMAKER, Ch. A. Constrained Global Optimization of Expensive Black Box Functions Using Radial Basis Functions. *Journal of Global Optimization*. 2005, 31(1), s. 153–171. ISSN 0925-5001. DOI: 10.1007/s10898-004-0570-0.
- [65] SHI, Y. a EBERHART, R. C. Parameter selection in particle swarm optimization. In Porto, V. W., Saravanan, N., Waagen, D., Eiben, A. E. (Ed.) *Evolutionary Programming VII*, s. 591–600. Springer Berlin Heidelberg, 1998. ISBN 978-3-540-68515-9.
- [66] SIMO, J. C. a JU, J. W. Strain- and stress-based continuum damage models—I. Computational aspects. *International Journal of Solids and Structures*. 1987, 23(7), 7, s. 821–840. ISSN 00207683. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90084-9.
- [67] SIMO, J. C. a JU, J. W. Strain- and stress-based continuum damage models—II. Computational aspects. *International Journal of Solids and Structures*. 1987, 23(7), s. 841–869. ISSN 00207683. DOI: 10.1016/0020-7683(87)90084-9.
- [68] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2006.
- [69] STRAUSS, A., ZIMMERMANN, T., LEHKÝ, D., NOVÁK, D. a KERŠNER, Z. Stochastic fracture-mechanical parameters for the performance-based design of concrete structures. *Structural Concrete*. 2014, 15(3), s. 380–394. ISSN 1464-4177. DOI: 10.1002/suco.201300077.
- [70] SUCHARDA, O. a BROŽOVSKÝ, J. Elastic-Plastic Modelling of Reinforced Concrete Beam: Implementation and Comparison with the Experiment. *Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava. Construction Series*. 2011, XI(1), s. 1–7. ISSN 1804-4824. DOI: 10.2478/v10160-011-0014-y.
- [71] SURJANOVIC, S. a BINGHAM, D. Optimization Test Problems: Booth function. *Virtual Library of Simulation Experiments: Test Functions and Datasets* [online, cit. 2021-06-10]. Simon Fraser University: Derek Bingham, 2013. Dostupné z: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/booth.html>.
- [72] SURJANOVIC, S. a BINGHAM, D. Optimization Test Problems: Ackley function. *Virtual Library of Simulation Experiments: Test Functions and Datasets* [online, cit. 2021-06-10]. Simon Fraser University: Derek Bingham, 2013. Dostupné z: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/ackley.html>.
- [73] SZELIGA, D., GAWAD, J. a PIETRZYK, M. Parameters identification of material models based on the inverse analysis. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2004, 14(4), s. 549–556. Dostupné z: <http://eudml.org/doc/207719>.
- [74] TALAR, J., SZELIGA, D. a PIETRZYK, M. Application of genetic algorithms for identification of rheological and friction parameters in copper deformation processes. *Archives of Metallurgy*. 2002, 47(1), s. 27–41.
- [75] TAYLOR, R., L., PISTER, K., S. a GOUDREAU, G., L. Thermomechanical analysis of viscoelastic solids. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1970, 2(1), s. 45–59. ISSN 0029-5981. DOI: 10.1002/nme.1620020106.
- [76] TRCALA, M., NĚMEC, I. VANĚČKOVÁ, A. a HOKEŠ, F. Dynamic analysis of viscous material models. In *Programs and Algorithms of Numerical Mathematics 20*, s. 139–148, Hejnice, 2021. Institute of Mathematics, Czech Academy of Sciences. DOI: 10.21136/panm.2020.14. Dostupné z: <https://articles.math.cas.cz/10.21136/panm.2020.14>. ISBN 9788085823714.
- [77] Wikipedia contributors. Test functions for optimization — Wikipedia, The Free Encyclopedia [online, cit. 2021-06-11], 2021. Dostupné z:

[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Test\\_functions\\_for\\_optimization&oldid=1024083311](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Test_functions_for_optimization&oldid=1024083311).

- [78] WILLAM, K. a WARNKE, E. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. In *International Assoc. for Bridge and Structural Engineering*, **19**, s. 1–30, 1975.
- [79] WITTMANN, F. H., ROKUGO, K., BRÜHWILER, E., MIHASHI, H. a SIMONIN, P. Fracture energy and strain softening of concrete as determined by means of compact tension specimens. *Materials and Structures*. 1988, **21**(1), s. 21–32. DOI: 10.1007/BF02472525.
- [80] YOSHIMURA, S., HISHIDA, H., a YAGAWA, G. Parameter optimization of viscoplastic constitutive equation using hierarchical neural network. In *Proceedings of 7th International Conference on Experimental Mechanics*, **1**, s. 296–301, 1992.

## PŘEHLED PUBLIKAČNÍCH AKTIVIT

### Články do časopisů v databázi Scopus

1. ŠMAK, M., KALA, J. a HOKEŠ, F. *Pinned joints – their design and real behaviour*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics. 2017, **170**(4), s. 154-166. ISSN 1755-0777. DOI:10.1680/jencm.17.00003
2. HOKEŠ, F. a KALA, J. *Selecting the objective function during the inverse identification of the parameters of a material model of concrete*. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2017, **11**(39), s. 7-16. ISSN 19718993. DOI:10.3221/IGF-ESIS.39.02
3. HOKEŠ, F., HUŠEK, M., KALA, J. a KRÁL, P. *Predicting the load-carrying capacity of reinforced concrete structural element*. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. World Scientific and Engineering Academy and Society, 2017, **12**, s. 1-10. ISSN 19918747.
4. HOKEŠ, F., KALA, J. a KRŇÁVEK, O. *Nonlinear numerical simulation of a fracture test with use of optimization for identification of material parameters*. *International Journal of Mechanics*, North Atlantic University Union, 2016, **10**, s. 159-166. ISSN 19984448
5. HUŠEK, M., KALA, J., KRÁL, P. a HOKEŠ, F. *Effect of the support domain size in SPH fracture simulations*, *International Journal of Mechanics*, North Atlantic University Union, 2016, **10**, s. 396-402. ISSN 19984448.

### Konferenční příspěvky v databázi Scopus

1. KRÁL, P., HRADIL, P., KALA, J., KALA, Z. a HOKEŠ, F. Using the inverse identification of parameters of a nonlinear concrete material model for analysis of RC structural element. In: *International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2018, ICNAAM 2018*. American In-

- stitute of Physics, 2019, s. 1-4. ISBN 978-073541854-7. ISSN 0094243X. DOI:10.1063/1.5114111
2. HOKEŠ, F., KALA, J., TRCALA, M. a NĚMEC, I. Implementation of the Viscous Drucker-Prager and Viscous Lee-Fenves Nonlinear Material Models and Finite Element Benchmarks. In: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies III*. CRC Press, 2019, s. 105-111. ISBN 9780429021596. DOI:10.1201/9780429021596-16
  3. HOKEŠ, F., KRÁL, P. a TRCALA, M. Modelling uniaxial compression of concrete specimen with utilization of nonlinear material models inside ANSYS and RFEM. In: *International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2018, ICNAAM 2018*. American Institute of Physics, 2019, s. 1-4. ISBN 978-073541854-7. ISSN 0094243X. DOI:10.1063/1.5114112
  4. HUŠEK, M., KALA, J., KRÁL, P. a HOKEŠ, F. Using noise to generate the material structure of concrete. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2018. ISBN 978-073541690-1. ISSN 0094243X. DOI:10.1063/1.5044017
  5. HUŠEK, M., KALA, J., KRÁL, P. a HOKEŠ, F. Steel Fibre Reinforced Concrete Simulation with the SPH Method. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2017. ISSN 1757-8981. DOI:10.1088/1757-899X/245/3/032070
  6. HUŠEK, M., KALA, J., HOKEŠ, F. a KRÁL, P. Conversion of Fractal Fields into Heterogeneities inside SPH Simulations. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2017. ISSN 1757-8981. DOI:10.1088/1757-899X/245/3/032024
  7. KRÁL, P., HOKEŠ, F., HUŠEK, M., KALA, J. a HRADIL, P. Optimization-Based Inverse Identification of the Parameters of a Concrete Cap Material Model. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2017. ISSN 1757-8981. DOI:10.1088/1757-899X/245/3/032078
  8. HOKEŠ, F., KRÁL, P., HUŠEK, M. a KALA, J. Study on Identification of Material Model Parameters from Compact Tension Test on Concrete Specimens. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2017, s. 1-10. ISSN 1757-8981. DOI:10.1088/1757-899X/245/3/032079
  9. KRÁL, P., HRADIL, P., HUŠEK, M. a HOKEŠ, F. Comparison of responses of concrete damage material models with respect to optimization-based material parameter identification. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2017. ISBN 978-073541538-6. ISSN 0094243X. DOI:10.1063/1.4992644

10. HUŠEK, M., KALA, J., KRÁL, P. a HOKEŠ, F. Concept and numerical simulations of a reactive anti-fragment armour layer. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2017. ISBN 978-073541538-6. ISSN 0094243X. DOI:10.1063/1.4992643
11. HOKEŠ, F., KRÁL, P., KRŇÁVEK, O. a HUŠEK, M. Improved Sensitivity Analysis in the Inverse Identification of the Parameters of a Nonlinear Material Model. In: *Procedia Engineering*. Elsevier, 2017, s. 347-354. ISSN 18777058. DOI:10.1016/j.proeng.2017.02.039
12. KRÁL, P., HRADIL, P., KALA, J., HOKEŠ, F. a HUŠEK, M. Identification of the Parameters of a Concrete Damage Material Model. In: *Procedia Engineering*. Elsevier, 2017, s. 578-585. ISSN 18777058. DOI:10.1016/j.proeng.2017.02.068
13. HOKEŠ, F., KALA, J., HUŠEK, M. a KRÁL, P. Parameter Identification for a Multivariable Nonlinear Constitutive Model inside ANSYS Workbench. In: *Procedia Engineering*. Elsevier, 2016, s. 892-897. ISSN 18777058. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.743
14. HUŠEK, M., KALA, J., HOKEŠ, F. a KRÁL, P. Influence of SPH Regularity and Parameters in Dynamic Fracture Phenomena. In: *Procedia Engineering*. Elsevier, 2016, s. 489-496. ISSN 18777058. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.671
15. HOKEŠ, F. Different Approaches to Numerical Simulations of Prestressed Concrete Structural Elements. In: *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, 2014, s. 148-153. ISBN 978-303835196-2. ISSN 1662-7482. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.621.148

## Publikace do recenzovaných periodik

1. NĚMEC, I., TRCALA, M., HOKEŠ, F., a VANĚČKOVÁ, A. Dynamic analysis of viscous material models. In: *Programs and Algorithms of Numerical Mathematics. Proceedings of Seminar. Hejnice, June 21-26, 2020*. Prague: Institute of Mathematics CAS, 2021. s. 139-147. ISBN: 978-80-85823-71-4.
2. HOKEŠ, F. Selected Aspects Of Modelling Of Non-Linear Behaviour Of Concrete During Tensile Test Using Multiplas Library. *Transaction of the VŠB-Technical university of Ostrava, Mechanical series*, 2015, **15**(2), s. 1-10. ISSN: 1210-0471.

## Další publikace

1. HOKEŠ, F., KALA, J. a NĚMEC, I. Video analysis of response of reinforced concrete beam to impact loading during drop test. In: *4th International Scien-*

- tific Conference Structural and Physical Aspects of Construction Engineering (SPACE 2019)*. MATEC Web of Conferences. CEDEX A: EDP Sciences, 2020. s. 1-6. ISSN: 2261-236X.
2. HOKEŠ, F., HUŠEK, M. a KRÁL, P. Nonlinear Numerical Study of Pin Joint at Static and Cyclic Loading. In: *Juniorstav 2017*. Brno, Česká republika: 2017. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5462-0.
  3. HUŠEK, M., HOKEŠ, F., KALA, J. a KRÁL, P. *Inclusion of Randomness into SPH Simulations*. WSEAS TRANSACTION on HEAT and MASS TRANSFER, 2017, **2017**(1), s. 1-10. ISSN: 2224-3461.
  4. HUŠEK, M., KALA, J., HOKEŠ, F. a KRÁL, P. *How to Handle Irregular Distribution of SPH Particles in Dynamic Fracture Analysis*. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, **2016**(1), s. 212-217. ISSN: 2367-8984.
  5. HOKEŠ, F., HUŠEK, M., KRÁL, P. a KALA, J. *Numerical Simulation of Reinforced Concrete Beam with Utilization of Elasto-plastic Material Model of Concrete*. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2016, **2016**(11), s. 136-141. ISSN: 2224-3429.
  6. HUŠEK, M., HOKEŠ, F., KALA, J. a KRÁL, P. *A Simple Solution for Randomized Failure Modeling with the SPH Method*. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, **2016**(1), s. 253-258. ISSN: 2367-8992.
  7. HOKEŠ, F. a KALA, J. Volba účelové funkce při inverzní identifikace parametrů materiálového modelu. In: *Modelování v mechanice 2016*. Ostrava, Česká republika: 2016. s. 1-7. ISBN: 978-80-248-3917-2.
  8. HOKEŠ, F. Predikce únosnosti železobetonového konstrukčního prvku. In: *Juniorstav 2016*. Brno, Česká republika: 2016. s. 1-8. ISBN: 978-80-214-5311-1.
  9. HOKEŠ, F. Comparison of suitability of selected material models of concrete for inverse identification of parameters with aid of optimization algorithms. In: *Computational Mechanics 2015*. Špičák: 2015.
  10. HOKEŠ, F. Modelování předpětí nesoudržnou předpínací výztuží ve výpočtovém systému ANSYS. In: *Juniorstav 2015*. Brno, Česká republika: 2015. s. 1-9. ISBN: 978-80-214-5091-2.
  11. KRŇÁVEK, O., HOKEŠ, F., HRUBÝ, P. a NEVAŘIL, A. Analýza vlivu postupné výstavby mostu na stav napjatosti v konstrukčních detailech. In: *Modelování v mechanice 2015*. Ostrava, Česká republika: 2015. s. 1-11. ISBN: 978-80-248-3756-7.
  12. KALA, J. a HOKEŠ, F. The Idealization of Boundary Conditions in Numerical Simulations of Prestressed Pedestrian Bridges and Comparing with

- Experimental Measurements. In: *Proc. of 16th European Bridge Conference*. Edinburgh, Scotland: M C Forde, 2015. s. 1-8. ISBN: 0-947644-78-4.
13. HOKEŠ, F., NEVAŘIL, A., TOTKOVÁ, L. a KRŇÁVEK, O. Numerická simulace procesu dotvarování a smršťování betonu na submodelu profilu oceľobetonového spřaženého mostu. In: *Proceedings of 13th International Conference of New Trends in Statics and Dynamics of Buildings* Bratislava, Slovensko: 2015. s. 1-8. ISBN: 978-80-227-4463-8.
  14. HRUBÝ, P., HOKEŠ, F., KRŇÁVEK, O. a NEVAŘIL, A. Numerical analysis of the process of repairing defects in lamellar flange and its influence on the local stress state. In: *Computational Mechanics 2015*. Špičák: 2015. s. 41-42. ISBN: 978-80-261-0568-8.
  15. HOKEŠ, F. Vliv redukce počtu návrhových parametrů při inverzní identifikaci parametrů nelineárních materiálových modelů s pomocí optimalizačních algoritmů. In: *Proceedings of 13th International Conference of New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Bratislava, Slovenská republika: 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-227-4463-8.
  16. HOKEŠ, F. The Current State-of-the-Art in the Field of Material Models of Concrete and Other Cementitious Composites. In: *Materials, Mechanics and Information Engineering*. Applied Mechanics and Materials. 2015. s. 134-139. ISBN: 978-3-03835-385-0. ISSN: 1662-7482.

## CURRICULUM VITAE

### Osobní údaje

Jméno a příjmení, titul: Filip Hokeš, Ing.  
Adresa trvalého bydliště: Na Rejdišti 613/6  
66902, Znojmo  
Česká republika  
Telefon: +420 602 718 491  
E-mail: hokes.f@fce.vutbr.cz  
Datum narození: 11. 12. 1988  
Národnost: Česká

## Pracovní zkušenosti

- 10/2016 – dosud *FEM consulting, s.r.o.*  
**Pozice:** Výzkumný pracovník, IT specialista  
**Náplň práce:** Výzkum a vývoj algoritmů pro konstrukční optimalizaci, správa hardware a software, správa sítě
- 09/2015 – dosud *VUT v Brně, FAST, Ústav stavební mechaniky*  
**Pozice:** Asistent  
**Náplň práce:** Vedení cvičení z předmětů: Statika I a II, Nelineární mechanika

## Vzdělání

- 02/2014 – dosud *VUT v Brně, Fakulta stavební*  
**Studijní program:** Stavební inženýrství, navazující doktorský  
**Obor:** Konstrukce a dopravní stavby  
**Téma disertační práce:** Komplexní výpočtové modely  
**Školitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.
- 09/2012 – 02/2014 *VUT v Brně, Fakulta stavební*  
**Studijní program:** Stavební inženýrství, navazující magisterský  
**Obor:** Konstrukce a dopravní stavby  
**Téma diplomové práce:** Statická a dynamická analýza předpjaté mostní konstrukce  
**Školitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.
- 09/2008 – 06/2012 *VUT v Brně, Fakulta stavební*  
**Studijní program:** Stavební inženýrství, bakalářský  
**Obor:** Konstrukce a dopravní stavby  
**Téma bakalářské práce:** Podrobná analýza složitých konstrukčních detailů  
**Školitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.

09/2004 – 06/2008 *Gymnázium Šumperk*  
**Maturitní zkouška:** Český jazyk, Anglický jazyk, Fyzika,  
Matematika

## **Pedagogická praxe**

- 01/2016 – dosud *VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky*  
výuka v rámci pedagogického úvazku – asistent  
**Cvičení z předmětu Statika I, Statika II a Nelineární me-  
chanika** (vedení cvičení)
- 09/2015 – 12/2015 *VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky*  
výuka v rámci povinné praxe doktorského studia  
**Cvičení z předmětu Statika II** (vedení cvičení)
- 02/2015 – 06/2015 *VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky*  
výuka v rámci povinné praxe doktorského studia  
**Cvičení z předmětu Statika I**  
(1. cvičící – vedení cvičení, 2. cvičící – zadávání a opravy  
kontrolních testů a domácích úkolů, konzultace)
- 09/2014 – 12/2014 *VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky*  
výuka v rámci povinné praxe doktorského studia  
**Cvičení z předmětu Statika II** (vedení cvičení)
- 02/2014 – 06/2014 *VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky*  
výuka v rámci povinné praxe doktorského studia  
**Cvičení z předmětu Základy stavební mechaniky**  
(2. cvičící – zadávání a opravy kontrolních testů a domácích  
úkolů konzultace)

## **Účast na řešení vědeckých projektů**

- 10/2017 – dosud *Projekt TAČR FW03010260*  
**Název:** Pokročilý softwarový nástroj pro návrh a ana-  
lýzu betonových a spřažených konstrukcí se zohledně-  
ním fází výstavby a časově závislých dějů  
**Řešitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.



- 10/2017 – 09/2020 *Projekt MPO TRIO FV20372*  
**Název:** Softwarový nástroj pro nelineární analýzu betonových konstrukcí u rychlých dynamických dějů  
**Řešitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.
- 02/2017 – 12/2019 *Projekt GAČR 17-23578S*  
**Název:** Identifikace míry poškození vyztuženého betonu při extrémním zatížení  
**Řešitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.
- 01/2017 – 12/2019 *Projekt TAČR TH02020301*  
**Název:** Pokročilý návrh zesilování ocelové konstrukce pod zatížením  
**Řešitel:** prof. Ing. Miroslav Bajer, CSC.
- 08/2016 – 12/2019 *Projekt MPO TRIO FV10317*  
**Název:** Pokročilé kotevní kontaktní materiály s využitím kompozitů  
**Řešitel:** Ing. Jan Barnat, Ph.D.
- 03/2016 – 12/2017 *Standardní projekt spec. výzkumu FAST-S-16-3718*  
**Název:** Pokročilé numerické metody s komplexními materiálovými modely  
**Řešitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.
- 05/2014 – 12/2017 *Projekt GAČR 14-25320S*  
**Název:** Aspekty použití komplexních nelineárních výpočtových modelů  
**Řešitel:** prof. Ing. Jiří Kala, Ph.D.
- 05/2014 – 11/2015 *Projekt MPO FR-TI4/430*  
**Název:** Pravděpodobnost prouchy svarového spoje lamelových pásnic s indikacemi zjištěnými progresivními nedestruktivními metodami  
**Řešitel:** Ing. Aleš Nevařil, Ph.D.
- 03/2016 – 12/2016 *Juniorský projekt spec. výzkumu FAST-J-16-3562*  
**Název:** Implementace materiálových modelů betonu ve výpočtovém systému ANSYS a jejich experimentální verifikace  
**Řešitel:** Ing. Filip Hokeš

- 03/2015 – 12/2015 *Juniorský projekt spec. výzkumu FAST-J-15-2875*  
**Název:** Vliv rychlosti deformace na parametry  
nelineárních materiálových modelů betonu  
**Řešitel:** Ing. Filip Hokeš
- 03/2014 – 12/2014 *Juniorský projekt spec. výzkumu FAST-J-14-2359*  
**Název:** Nelineární výpočtové modely předpjatých be-  
tonových prvků  
**Řešitel:** Ing. Filip Hokeš

## **Přehled dalších aktivit**

- 10/2017 – dosud *Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně*  
Příprava, provádění a vyhodnocení experimentálních  
měření na železobetonových vzorcích
- 05/2014 – dosud *Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně*  
Správa počítačových učeben, IT specialista

## ABSTRAKT

Problematiku identifikace parametrů při numerických simulacích lze považovat za nezbytný krok při využití matematických modelů, jakými jsou komplexní materiálové modely stavebních materiálů využívaných v metodě konečných prvků. Problém se zvláště zesiluje v případě anizotropních materiálů, ale také u betonu, který se odlišně chová v tahu nebo tlaku a který vykazuje odlišnou odezvu při rychlém dynamickém a dlouhodobém zatížení. Korektní vystižení odezvy betonu při výpočtu si vyžaduje použití teorie plasticity, teorie poškození, viskoelasticity a viskoplasticity či jejich vzájemné kombinace. Vznikají tak materiálové modely a reologická schémata s velkým množstvím parametrů, které nejsou v normách běžně dostupné. Dizertační práce představuje pro identifikaci parametrů aplikaci meta-heuristického algoritmu Particle Swarm. Úspěšnost metody je demonstrována na dvojici případů, nejprve na identifikaci parametrů elastoplastického materiálového modelu z pracovního diagramu a poté na identifikaci hodnot tuhostních konstant a viskozit reologického schématu z křivky dotvarování.

## ABSTRACT

The issue of parameter identification within numerical simulations can be considered a necessary step in the use of mathematical models, such as complex material models of building materials utilized in finite element method. The problem is particularly emphasized in the case of anisotropic materials but also in the case of concrete, which behaves differently in tension or compression and which shows different response under rapid-dynamic and long-term loading. Correct capture of the concrete response in the computation requires usage of plasticity theory, damage theory, visco-elasticity and visco-plasticity or their mutual combinations. It results in development of material models and rheological schemes with large amount of parameters that are not commonly available in standards. The dissertation presents application of meta-heuristic algorithm Particle Swarm for parameter identification. The success of the method is demonstrated in a pair of cases, first on the identification of elastoplastic material model parameters from stress strain diagram and then to identify the values of stiffness constants and viscosities of the rheological scheme from a creep curve.