

Jakub VAŠEK¹, Martin KREJSA²

**PRAVDĚPODOBNOSTNÍ POSOUZENÍ SPOLEHLIVOSTI PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE
V PROGRAMOVÉM SYSTÉMU MATLAB**

**PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF TRUSS CONSTRUCTION
IN MATLAB SOFTWARE PLATFORM**

Abstrakt

Příspěvek se zabývá využitím pravděpodobnostních postupů při posouzení spolehlivosti příhradové nosné konstrukce. K výpočtu pravděpodobnosti poruchy posuzovaných nosných prvků i celého nosného systému byla zvolena klasická simulační technika Monte Carlo, aplikovaná v programovém systému MATLAB s využitím daného generátoru pseudonáhodných čísel a možnosti paralelizace u vícejádrových procesorů. Cílem práce byla analýza využitelnosti MATLABu pro pravděpodobnostní výpočty a pravděpodobnostní posudky spolehlivosti nosných konstrukcí.

Klíčová slova

MATLAB, posudek spolehlivosti, pravděpodobnostní metody, Monte Carlo, pravděpodobnost poruchy, funkce spolehlivosti, generátor pseudonáhodných čísel, paralelizace.

Abstract

This paper deals with the use of probabilistic methods in assessing the reliability of the truss support structure. Classical Monte Carlo simulation technique was chosen for calculation of failure probability in structural elements and the entire support system under assessment. Numerical calculation was applied in MATLAB software system using the random number generator and parallelization using multi-core processors. The aim of the study was to analyse the usability of MATLAB for probability calculations and probabilistic reliability assessments of load-bearing structures.

Keywords

MATLAB, reliability assessment, probabilistic methods, Monte Carlo, probability of failure, reliability function, generator of pseudorandom numbers, parallelization.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Nosný systém každé stavební konstrukce by měl splňovat řadu podmínek, které se v proceduře posuzování objevují ve formě kritérií spolehlivosti. Určováním pravděpodobnosti, s jakou budou požadované vlastnosti stavebních objektů zachovány, se zabývá vědní obor teorie spolehlivosti konstrukcí [16]. Aplikace teorie spolehlivosti vede k využívání pravděpodobnostních výpočetních postupů, založených na teorii pravděpodobnosti a matematické statistiky, jejichž vývoj začíná

¹ Jakub Vašek, Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, student 4. ročníku bakalářského studia oboru Konstrukce staveb, e-mail: jakub.vasek.st@vsb.cz.

² doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 303, e-mail: martin.krejsa@vsb.cz.

v poslední době značný vzestup [1, 9, 21].

1.1 Pravděpodobnostní výpočty

Hlavním rysem pravděpodobnostních metod je možnost vyjádření variability, resp. nahodilosti vstupních i výstupních veličin pravděpodobnostně např. formou histogramů. Na rozdíl od současně platných normových postupů, založených na deterministickém pojetí vstupních veličin [13, 14, 15], pak pravděpodobnostní postupy vedou ke kvalitativně vyšší úrovni posudku spolehlivosti i zajištění bezpečnosti uživatelů stavebních objektů [11, 20, 22, 24, 25].

Tato práce si klade za cíl zmapovat možnosti pravděpodobnostních výpočtů v programovém systému MATLAB se zaměřením na posouzení spolehlivosti vybrané příhradové konstrukce.

1.2 Simulační metoda Monte Carlo

Výpočet pravděpodobnosti poruchy u posuzovaných nosných konstrukcí umožňuje řada výpočetních postupů a metod. Nejpočetnější a nejpoužívanější skupinu pravděpodobnostních nástrojů představují metody založené na simulační technice Monte Carlo, tedy na opakovaných vyčísleních (realizacích, simulacích) funkce spolehlivosti.

Klasická simulace Monte Carlo je snadno aplikovatelná a všeobecně srozumitelná [2, 19]. Při řešení výpočetně náročnějších úloh je již však málo efektivní, neboť dostatečně přesné řešení vyžaduje velký počet simulací.

Z tohoto důvodu je patrný rozvoj dalších metod založených na simulacích - tzv. zdokonalené a stratifikované simulační metody (např. Latin Hypercube Sampling – LHS [18, 23], Response Surface Method – RSM [8]), u kterých lze dosáhnout zvýšené efektivity vyčíslení výsledné pravděpodobnosti poruchy redukcí rozptylu jednotlivých simulací a jejich koncentrování do oblasti poruchy, což umožňuje výrazné snížení výpočetního času.

1.3 Pravděpodobnostní posouzení

V procesu návrhu konstrukce se provádí řada výpočetních operací, souvisejících s posudkem spolehlivosti jednotlivých konstrukčních částí nebo konstrukce jako celku. Musí být splněna různá kritéria spolehlivosti, definovaná příslušnými normovými předpisy, ve kterých figurují dvě klíčové veličiny - odolnost konstrukce R a účinek zatížení E .

Pravděpodobnostní posudek spolehlivosti pak může být založen na analýze funkce spolehlivosti, která může být definovaná např.:

$$RF_{(x)} = R - E \quad , \quad (1)$$

kde \mathbf{X} je vektor náhodných vstupních proměnných - např. mechanických vlastnosti materiálu, geometrie konstrukce, účinků zatížení nebo vlivu prostředí na konstrukci.

Podmínka spolehlivosti pak může být vyjádřena ve tvaru:

$$E \leq R \rightarrow R - E \geq 0 \rightarrow RF_{(x)} \geq 0 \quad . \quad (2)$$

Nesplnění podmínky (2) představuje z hlediska spolehlivosti nepříznivý, tzn. poruchový stav, kdy účinek zatížení E převyšuje odolnost konstrukce R .

Analýzou funkce spolehlivosti (1) pak lze získat pravděpodobnost poruchy P_f :

$$P_f = P(RF_{(x)} < 0) = P(R - E < 0) \quad , \quad (3)$$

kteřou lze porovnat s mezní návrhovou pravděpodobností poruchy P_d , definovanou společně se směrnými úrovněmi spolehlivosti v ČSN EN 1993-1-1, podrobněji pak v ČSN ISO 2394. Konstrukce je spolehlivá za splnění podmínky spolehlivosti:

$$P_f \leq P_d \quad . \quad (4)$$

Pravděpodobnostní posouzení lze provést i na úrovni indexu spolehlivosti [3, 10]:

$$\beta \geq \beta_d \quad . \quad (5)$$

2 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ POSOUZENÍ V PROSTŘEDÍ PROGRAMOVÉHO SYSTÉMU MATLAB

Software MATLAB představuje programovací prostředí s širokou mírou uplatnění. Primárně je tento software určen k maticovým výpočtům, díky rozsáhlé knihovně funkcí jej však lze využít také například ke statistické analýze či k řešení pravděpodobnostních úloh.

2.1 Funkce MATLABu vhodné k pravděpodobnostním výpočtům

Mezi základní operace prováděné při pravděpodobnostních výpočtech patří práce s velkým objemem dat. Ke statistické analýze hodnot představujících například zatížení či materiálové charakteristiky lze s výhodou využít funkci „hist“. Tato funkce vytváří ze zadaného statistického souboru (vektoru čísel) histogram, reprezentující četnost jednotlivých hodnot. Výstupem je grafické zobrazení histogramu, vektor absolutních četností a vektor obsahující střední hodnoty tříd, pro které byl histogram určen. Počet tříd představuje vstupní parametr funkce „hist“, přičemž implicitně je nastaven na hodnotu 10.

Další možností zadání vstupních veličin do výpočtu může být parametrické rozdělení pravděpodobnosti. Součástí knihovny softwaru MATLAB je také funkce „pdf“ (probability density functions), která slouží k vytvoření celé řady parametrických rozdělení pravděpodobnosti, např. rovnoměrné, normální nebo lognormální. Argument této funkce je tvořen názvem parametrického rozdělení pravděpodobnosti, vektorem reprezentující definiční obor zadaného rozdělení a příslušnými parametry. Na funkci „pdf“ navazuje nepřímou funkcí „cdf“ (cumulative distribution function). Vstupní hodnoty jsou totožné, ale výstupem je distribuční funkce. K usnadnění aplikace parametrických rozdělení existují v rámci základního rozhraní softwaru MATLAB také funkce „randtool“ a „disttool“, které vyvolají okno s možností zobrazení všech implementovaných parametrických rozdělení.

Velký význam má u pravděpodobnostních výpočtů s využitím simulačních technik generátor pseudonáhodných čísel. Pro pravděpodobnostní posudky konstrukcí je využíváno generování pseudonáhodných čísel s rovnoměrným rozdělením. Kvalitu generátoru pseudonáhodných čísel lze vyjádřit periodou opakování neboli skupinou čísel, která se v průběhu generování opakuje. K řešení tohoto případu slouží funkce „rand“ [6], která vytváří pseudonáhodná čísla v rozmezí 0 a 1. Funkce „rand“ v nejstarších verzích softwaru MATLAB využívala Lehmerova rekurentního vztahu:

$$x_{k+1} = (a \cdot x_k + c) \bmod m, \quad (6)$$

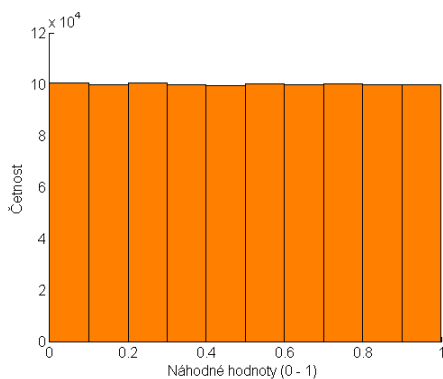
kde jednotlivé veličiny nabývají hodnot: $a = 7^5 = 16807$, $c = 0$ a $m = 2^{31} - 1 = 2147483647$.

Pro uvedené hodnoty konstant činí perioda opakování přes 2 miliardy čísel. Během zdokonalování výpočetní techniky i samotného systému MATLAB došlo postupně i k úpravě výpočetního algoritmu generátoru. Od 5. verze tohoto softwaru činí perioda opakování 2^{1492} čísel. Tato hodnota periody je pro simulační metody plně dostačující.

Na ukázkou práce generátoru pseudonáhodných čísel v programovém systému MATLAB byl sestrojen histogram četností náhodně generovaných čísel s rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti, jenž je zobrazen na obr. 1. Histogram byl vytvořen pro $1 \cdot 10^6$ pseudonáhodných čísel generovaných funkcí „rand“.

2.2 Optimalizace simulačního výpočtu

K dosažení dostatečně přesného výsledku simulačních metod je důležité velké množství simulačních kroků. S tímto faktem je spojena časová náročnost výpočtu. Opatřením, které eliminuje výpočetní čas, může být paralelizace výpočtu na vícejádrových procesorech (podobně jako v [7]). Tento přístup lze aplikovat i v prostředí programového systému MATLAB. Příkazem, který uvede do pohotovosti jádra procesoru, se nazývá „matlabpool“ [17]. Argumentem tohoto příkazu je počet jader, která mají být následně použita pro výpočet. Vzhledem ke skutečnosti, že simulační techniky představují cyklus se známým počtem opakování, lze využít úpravu cyklu „for“ na „parfor“ [17].



Obr.1: Histogram vytvořený z vygenerovaných pseudonáhodných čísel

```

87
88 - matlabpool('open',2)
89
90 - parfor i=1:n...
117
118 - matlabpool close
119

```

Obr.2: Příklad zápisu optimalizační příkazů „matlabpool“ a „parfor“

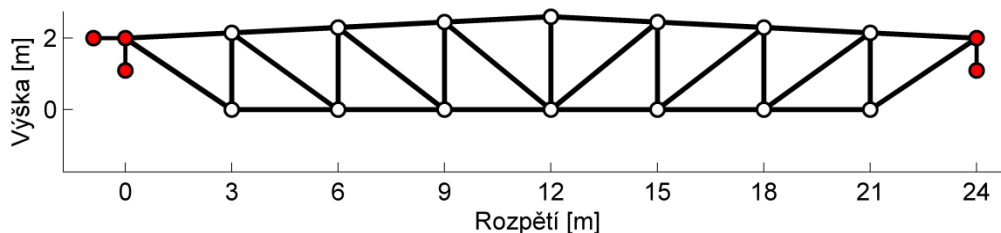
Příklad zápisu těchto příkazů v softwaru MATLAB je zobrazen na obr. 2. V tomto případě se výpočetní operace v simulačním cyklu rozdělí na 2 části, které jsou řešeny odděleně příslušným jádrem procesoru. Tyto výpočetní úkony probíhají dynamicky, kdy se na začátku dalšího kroku cyklu přiřadí příslušná výpočetní operace volnému jádru procesoru, čímž dochází k optimálnímu využití procesoru.

Při použití cyklu „parfor“ musí být dodržena určitá omezení. Prvním předpokladem použití této optimalizace je nezávislost jednoho simulačního cyklu na druhém. V případě simulační techniky Monte Carlo u dále uvedeného příkladu byl tento předpoklad splněn, protože v každém simulačním kroku se u každé náhodné proměnné generují nové statisticky nezávislé hodnoty. Další podmínkou je využití pouze jednoho cyklu „parfor“. Pokud je z nějakých důvodů nutné využít vnitřní smyčku, musí být použit standardní cyklus „for“.

Omezení, které se projevilo při algoritizaci simulační techniky v softwaru MATLAB, souvisí s ukládáním dat. Pokud se výsledky simulace průběžně zaznamenávají do matice, je ji nutné nejprve vynulovat. Pokud se během paralelní smyčky do matice ukládají data pomocí indexování, je žádoucí předem znát rozměr matice výsledků. Během souběžného výpočtu totiž nelze matici mazat, ani upravovat její velikost. Z tohoto důvodu byl celý níže uvedený simulační proces rozdělen na menší celky, po kterých došlo k částečnému vyhodnocení a vynulování matice výsledků.

3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ POSOUZENÍ PŘÍHRADOVÉ KONSTRUKCE

V softwaru MATLAB byl pomocí výše uvedených funkcí naprogramován výpočetní model pravděpodobnostního posouzení ocelového příhradového vazníku, založeném na simulační technice Monte Carlo. Pravděpodobnost poruchy byla zjišťována jak u jednotlivých nosných prvků - prutů, tak u konstrukce jako celku s referenční dobou 50 let. Pro výpočet vnitřních sil u jednotlivých prutů byla využita obecná deformační metoda.



Obr.3: Statické schéma posuzované příhradové konstrukce

3.1 Popis řešené konstrukce

Posuzovaná příhradová konstrukce je tvořena 29 pruty z oceli pevnostní třídy S 235 (statické schéma viz obr. 3). Příhradový vazník tvoří pruty z rovnoramenných úhelníků, přičemž stojky a diagonální pruty jsou tvořeny dvojicí těchto profilů.

3.2 Vstupní údaje

Řešená konstrukce byla nejprve navržena a posouzena podle stávajících normových postupů. Výsledné dimenze profilů jednotlivých prutů pak byly použity i při definici výpočetního modelu pravděpodobnostního výpočtu.

U řešení pravděpodobnostní úlohy jsou vstupní a výstupní náhodně proměnné veličiny vyjádřeny pravděpodobnostně např. formou useknutých histogramů [4, 12]. K náhodně proměnným veličinám, ovlivňující odolnost ocelové konstrukce, patří napětí na mezi kluzu, průřezové charakteristiky (průřezová plocha a moment setrvačnosti). Variabilita průřezových vlastností může být vyjádřena např. postupem podle [4], který spočívá ve vyjádření statisticky závislých průřezových charakteristik jednaparametricky s využitím histogramu ε (lze rovněž použít postup podle [5]).

Vstupní náhodně proměnné veličiny ovlivňující odolnost řešené konstrukce jsou uvedeny v tabulce 1. Modul pružnosti oceli v tahu a tlaku byl vyjádřen deterministicky $E = 210$ GPa.

Tab.1: Náhodně proměnné veličiny vstupující do výpočtu odolnosti konstrukce

Proměnná	Název	Jednotky	Název histogramu	Rozsah hodnot	
				Minimum	Maximum
Rozptyl charakteristik průřezu	ε	[-]	Epsilon	0,0268...	0,0402...
Mez kluzu oceli	f_y	[MPa]	Bars-Fy235-01	207	421

Tab.2: Náhodně proměnné veličiny vstupující do výpočtu účinku zatížení

Proměnná	Název	Jednotky	Název histogramu	Rozsah hodnot	
				Minimum	Maximum
Stálé zatížení	DL	1,91	DEAD1	0,818	1
Zatížení sněhem	SL	10,88	SNOW2	0	1
Zatížení větrem	WL	5,01	WIND1	-1	1

U veličin, reprezentující účinky zatížení, bylo uvažováno s vlivem zatížení stálého, sněhem, větrem a vlastní tíhou. V tabulce 2 jsou uvedeny vstupní hodnoty náhodně proměnných veličin všech typů zatížení. Zatížení větrem, sněhem a zatížení stálé působí ve styčnicích horního pásu příhradového vazníku. Síly reprezentující vlastní tíhu jsou přepočítány podle proměnné průřezové plochy a objemové hmotnosti oceli do každého uzlu konstrukce. Výsledné hodnoty vnitřních sil pak v prutech symetrických k ose symetrie dané konstrukce vycházely vzhledem k proměnné průřezové ploše odlišně.

3.3 Výpočetní model

Algoritmus výpočtu lze obecně rozdělit do tří částí. V první části probíhá načtení dat pro příslušné náhodně proměnné veličiny a následně jsou vytvořeny histogramy a příslušné distribuční funkce. Také je potřebné načíst údaje, definující geometrii nosného systému - souřadnice

uzlů, popis prutů, podpor a zatěžovacích vektorů. Pro posouzení spolehlivosti je nutno zadat rovněž hodnoty vzpěrných délek.

V druhé části vytvořeného algoritmu probíhá vlastní simulace Monte Carlo. Při využití simulačních metod je nutné k zjištění přesnějšího řešení vyšší počet simulací. V tomto případě byl výpočet proveden s počtem $30 \cdot 10^6$ simulací. Variační koeficient výsledné pravděpodobnosti poruchy lze pro malé pravděpodobnosti definovat ve tvaru:

$$v_{P_f} = \frac{1}{\sqrt{N \cdot P_f}}, \quad (7)$$

kde N je počet simulací a P_f řád určované pravděpodobnosti poruchy. Pro danou úlohu lze tedy očekávat výsledek zatížený chybou, vyjádřenou variačním koeficientem $\pm 5\%$. Z tohoto hlediska lze počet simulačních kroků považovat za dostatečný.

Během simulace jsou nejprve určeny hodnoty zatížení. Zatěžovací vektory představují síly, kterými je konstrukce zatížena, přičemž vynásobením jednotlivých vektorů zatížení s příslušnou náhodně vygenerovanou hodnotou distribuční funkce dojde k začlenění pravděpodobnosti do výpočtu. Součtem všech zatěžovacích vektorů lze získat zatěžovací vektor celé konstrukce. Následně může proběhnout výpočet obecnou deformační metodou, kterým lze určit náhodně proměnné velikosti vnitřních sil v konstrukci.

Poslední, třetí část algoritmu zpracovává data z výpočtu a porovnává hodnoty vnitřních sil z jednotlivých simulačních kroků s limitními hodnotami. Ke snížení nároků na paměť při samotném posouzení prutů umožňuje algoritmus ukládat do paměti pouze hodnoty 1 nebo 0 u každého ze simulačních kroků (1 reprezentuje stav poruchy, 0 stav spolehlivý), čehož lze využít v případě potřeby pouze číselného vyjádření výsledné pravděpodobnosti poruchy. Pokud jsou ovšem požadovány grafické výstupy výsledků - histogramy výsledných veličin (např. funkce spolehlivosti), algoritmus umožňuje v jednotlivých simulačních krocích ukládat kompletní dosažené výsledky (např. hodnoty vnitřních sil).

3.4 Posouzení spolehlivosti nosných prvků

Posuzovaná příhradová konstrukce je vystavena pouze účinkům osového namáhání, přičemž mohou být nosné prvky namáhány tahem nebo prostým či vzpěrným tlakem.

Při posudku spolehlivosti taženého prutu a prutu namáhaného prostým tlakem je jeho odolnost vyjádřena:

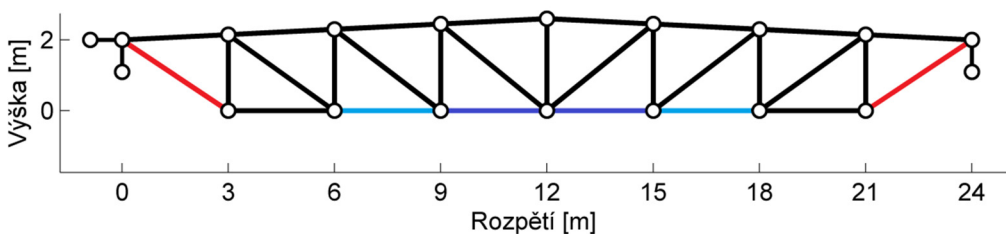
$$R = N_{Rd} = |f_y \cdot A|, \quad (8)$$

kde f_y reprezentuje napětí na mezi kluzu oceli [MPa] a A představuje průřezovou plochu prutu [m²].

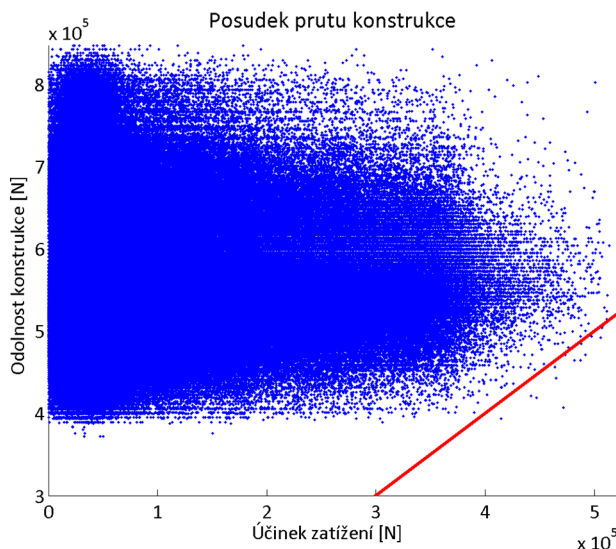
Při definování odolnosti prutu namáhaného vzpěrným tlakem se vychází z Eulerovy kritické síly:

$$R = N_{Rd} = F_{cr} = \pi^2 \frac{EI_y}{L_{cr}^2}, \quad (9)$$

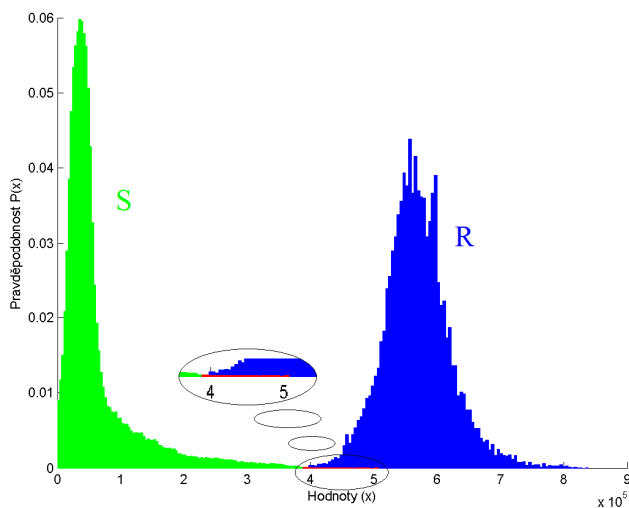
kde E je modul pružnosti v tahu a tlaku oceli [MPa], I_y moment setrvačnosti průřezu [m⁴] a L_{cr} vzpěrná délka [m].



Obr.4: Schematicky znázorněný výsledek pravděpodobnostního výpočtu



Obr.5: Výstup z programu MATLAB: posouzení spolehlivosti taženého prutu spodního pásu příhradové konstrukce a grafická interpretace výsledků jednotlivých simulací - každá z teček grafu vyjadřuje výsledný účinek zatížení (horizontální osa) a odolnost konstrukce (vertikální osa) pro každý simulační krok, červená přímka vyznačuje hranici poruchy, která odděluje oblast poruchovou (vpravo dole) od oblasti, kdy je spolehlivost konstrukce zachovaná



Obr.6: Výstup z programu MATLAB: posouzení spolehlivosti taženého prutu – vlevo histogram účinku zatížení (zeleně), vpravo histogram odolnosti konstrukce (modře), detail ukazuje oblast poruchy, kde dochází ke vzniku pravděpodobnosti poruchy podle (3)

Na obr. 4 je zobrazena posuzovaná konstrukce s výsledkem pravděpodobnostního posouzení. Černé označené pruty představují nosné prvky, u nichž nedošlo během simulací k poruše. Důvodem tohoto výsledku může být skutečnost, že při návrhu podle ČSN EN 1993-1-1, ze které vycházelo zadání, nehraje roli pouze limitní únosnost, ale také limitní hodnota štihlosti prvku. Dalším faktorem, ovlivňující nulovou pravděpodobnost u některých prutů je fakt, že se při návrhu dimenzuje vždy skupina prutů (diagonály jsou tvořeny jedním profilem). Modrou barvou jsou zaznačeny pruty, u kterých došlo k překročení únosnosti v tahu. Při gravitačním zatížení vycházejí tahové síly v dolním

pásu vazníku, čemuž také odpovídá pravděpodobnostní výsledek. Poslední skupinou prutů odlišených červenou barvou jsou krajní diagonální pruty. U těchto prutů došlo k překročení únosnosti ve vzpěrném tlaku. Namáhání takto uložených prvků při gravitačním zatížení je tahové, vzhledem k působení sání větru však v diagonálních prutech může vzniknout také tlaková normálová síla.

Další výstup pravděpodobnostního výpočtu v programu MATLAB je znázorněn na obr. 5. Uvedený bodový graf byl vytvořen z vypočtených hodnot taženého prutu dolního pásu konstrukce. Každý modrý bod v grafu představuje jeden simulační krok. Vodorovná osa reprezentuje účinky zatížení. Na svislé ose jsou vyznačeny hodnoty odolnosti konstrukce. Body nacházející se pod červeně vyznačenou přímkou nespĺňují podmínku spolehlivosti (2), představují tedy simulace, u kterých došlo k poruše prvku s odolností konstrukce R menší nežli účinek zatížení E . Oblast poruchy taženého nosného prvku řešené konstrukce je pak detailně zobrazena na obr. 6.

3.5 Posouzení spolehlivosti konstrukce

Pravděpodobnostní posouzení může probíhat na úrovni jednotlivých prvků, ale také lze zjistit pravděpodobnost poruchy celé konstrukce jako systému. Za poruchový stav konstrukce je považován stav, kdy dojde k poruše alespoň u jednoho z prutů. Z tohoto předpokladu lze usuzovat, že pravděpodobnost poruchy konstrukce jako celku bude vyšší (nebo stejná), než pravděpodobnost poruchy jednotlivých prvků, neboť při výpočtu pravděpodobnosti poruchy celého systému dochází k poruchovým stavům častěji (stačí porucha na jednom z prutů) nežli při posuzování spolehlivosti u jednotlivých prutů (k poruchovému stavu dochází jen na daném prvku, nemají na něj vliv poruchové stavy ostatních prutů). Této skutečnosti odpovídají i výsledné pravděpodobnosti poruchy uvedené v tab. 3. Nutno však podotknout, že toto tvrzení souvisí pouze s řešenou staticky určitou příhradovou konstrukcí a předpokladem pružného chování materiálu. V případě staticky neurčitých prutových konstrukcí a složitějších materiálových modelů by vztah pravděpodobnosti poruchy nosného prvku a celého systému byl komplikovanější. Členové autorského kolektivu by se na zkoumání těchto úloh chtěli zaměřit v dalším bádání.

Tab.3: Výsledky pravděpodobnostního posouzení příhradové konstrukce

<i>Posuzovaný prut</i>	<i>Rozhodující namáhání</i>	<i>Počet poruchových stavů</i>	<i>Pravděpodobnost poruchy P_f</i>	<i>Index spolehlivosti β</i>
Diagonála (levá)	Tlak	22	$7,33 \cdot 10^{-7}$	4,82
Diagonála (pravá)	Tlak	20	$6,67 \cdot 10^{-7}$	4,84
Dolní pás (1. zleva)	Tah	3	$1,00 \cdot 10^{-7}$	5,21
Dolní pás (2. zleva)	Tah	186	$6,20 \cdot 10^{-6}$	4,38
Dolní pás (3. zleva)	Tah	184	$6,13 \cdot 10^{-6}$	4,38
Dolní pás (4. zleva)	Tah	2	$6,67 \cdot 10^{-8}$	5,29
Celá konstrukce	-	411	$1,37 \cdot 10^{-5}$	4,20

4 ZÁVĚR

Příspěvek poukázal na možnost využití programového systému MATLAB pro pravděpodobnostní výpočty na základě pravděpodobnostního posouzení nosných prvků i systému ocelového příhradového vazníku. Bylo popsáno pravděpodobnostní řešení, při kterém byla v programovém prostředí systému MATLAB s využitím vestavěných a v příspěvku popsaných funkcí provedena statistická analýza vstupních dat, simulace s využitím metody Monte Carlo i paralelizace simulačního výpočtu.

Ukázalo se, že programový systém umožňuje s výhodou řešit podobně formulované pravděpodobnostní úlohy. Vzhledem k možnosti relativně snadného programování lze MATLAB využít i pro pravděpodobnostní úlohy se složitějším výpočetním modelem (definované např. s využitím obecné deformační metody nebo metody konečných prvků).

PODĚKOVÁNÍ

Tvorba článku byla realizována za finanční podpory z prostředků koncepčního rozvoje vědy, výzkumu a inovací pro rok 2014 přidělených VŠB-TU Ostrava Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

LITERATURA

- [1] BROŽOVSKÝ, J. a P. KONEČNÝ. Stochastic response of reinforced concrete structures to technical seismicity. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering, PARENG 2011*. Civil-Comp Proceedings, Vol. 95, ISBN: 978-190508842-3, 2011.
- [2] GHOSH, P., P. KONEČNÝ a P. J. TIKALSKY. SBRA model for corrosion initiation of concrete structures. *RILEM Bookseries*, Vol. 5, pp. 85-100 (16 p), ISSN: 22110844, DOI: 10.1007/978-94-007-0677-4_5, 2011.
- [3] HOLICKÝ, M., J. MARKOVÁ a M. SÝKORA. Overview of target reliability levels in present standards. In: *Sborník mezinárodní konference Modelování v mechanice 2014*, (8 p). VŠB-TU Ostrava, ISBN 978-80-248-3320-0, 2014.
- [4] JANAS, P., M. KREJSA a V. KREJSA. Software Package Probcalc from the Point of View of a User. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. X, Issue 1, pp. 1–11, ISSN (Online) 1804-4824, ISSN (Print) 1213-1962, DOI: 10.2478/v10160-010-0010-7, 2010.
- [5] JANAS, P. a M. KREJSA. Statistical Dependence of Input Variables in DOProC Method. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. XII, Issue 2, pp. 48–58 (11 p), ISSN (Online) 1804-4824, ISSN (Print) 1213-1962, DOI: 10.2478/v10160-012-0017-3, 2012.
- [6] KAHÁNEK, P. Generátor náhodných čísel v Matlabu. In: *Sborník konference Technical computing 2005*, Praha. (10 p) [on-line]. Dostupné na <http://dsp.vsch.tu.cz/konference_matlab/MATLAB05/prispevky/kahaneck/kahaneck.pdf>, 22.1. 2014
- [7] KONEČNÝ, P. a J. BROŽOVSKÝ. Simulation based reliability assessment method using parallel computing. In: *Proceedings of 1st International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing for Engineering, PARENG 2009*. Vol. 90, ISBN: 978-190508827-0, 2009.
- [8] KRÁLÍK, J. a J. KRÁLÍK Jr. Probability assessment of analysis of high-rise buildings seismic resistance. *Advanced Materials Research*, vol. 712-715, pp. 929-936, ISSN 1022-6680, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.712-715.929, 2013.
- [9] KRÁLÍK, J. Probabilistic nonlinear analysis of reinforced concrete bubbler tower structure failure. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. XIV, Issue 1, pp. 9–20 (12 p), ISSN (Online) 1804-4824, ISSN (Print) 1213-1962, DOI: 10.2478/tvsb-2014-0002, 2014.
- [10] KREJSA, M., P. JANAS a R. ČAJKA. Using DOProC Method in Structural Reliability Assessment. *Applied Mechanics and Materials: Mechatronics and Applied Mechanics II*. Zurich, Switzerland: Trans Tech Publications, Vols. 300 - 301, pp. 860-869 (10 p). ISSN 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.300-301.860, 2013.
- [11] KŘIVÝ, V. Reliability assessment of steel frames allowing for corrosion effects. In: *12th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, CC 2009*, Funchal, Portugal, (15 p). ISBN: 978-190508830-0, 2009.
- [12] MAREK, P., M. GUŠTAR a M. KREJSA. Simulation-based reliability assessment: Tool for efficient steel design. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 46, Issue 1-3, pp. 156-158 (3 p), ISSN: 0143974X, DOI: 10.1016/S0143-974X(98)80011-4, 1998.
- [13] MARSCHALCO, M., T. PEŇÁZ a L. FOJTOVÁ. The Importance of Implementing Transparent Geological Structure into Land-use Planning Documentation. *Transactions of the*

VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. Vol. IX, Issue 1, pp. 217–226 (10 p), ISSN (Print) 1213-1962, 2009.

- [14] MARSCHALCO, M., L. TŘESLÍN a H. LAHUTA. The GIS Assessment of Engineering-geological Zones of Greatest Regional Importance of Slezská Ostrava, Vítkovice and Radvanice. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. Vol. VIII, Issue 1, pp. 405–414 (10 p), ISSN (Print) 1213-1962, 2008.
- [15] MARSCHALCO, M. Evaluation of the Influence of Saturation on Slope Stability in Type Models of Deluvial-Eluvial Complexes of Various Thicknesses in the Outer Carpathian Flysch. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, GeoScience Engineering*. Vol. LI, Issue 1, pp. 27-36 (10 p), ISSN 0474-8476, 2005.
- [16] MELCHERS, R. E. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd., England, (437 p), ISBN 0-471-98324-1, 1999.
- [17] MOLER, C. *Numerical computing with MATLAB*, Chapter 9 – Random numbers, (15 p), The MathWorks, Inc., Natick, MA (electronic edition), SIAM, Philadelphia (print edition). [on-line]. <http://www.mathworks.com/moler/random.pdf>, 2004.
- [18] NOVÁK, D., B. TEPLÝ, D. LEHKÝ a R. PUKL. Probabilistic life-cycle assessment of civil engineering concrete structures. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013*, pp. 4739-4742 (4 p), ISBN: 978-113800086-5, 2013.
- [19] LOKAJ, A., K. VAVRUŠOVÁ a E. RYKALOVÁ. Application of laboratory tests results of dowel joints in cement-splinter boards VELOX into the fully probabilistic methods (SBRA method). *Applied Mechanics and Materials*, vol. 137, pp. 95-99 (5 p). ISSN: 16609336, ISBN: 978-303785291-0, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.137.95, 2012.
- [20] SLOWIK, O. a D. NOVÁK. Algoritmizace spolehlivostní optimalizace. In: *Sborník mezinárodní konference Modelování v mechanice 2014*, (12 p). VŠB-TU Ostrava, ISBN 978-80-248-3320-0, 2014.
- [21] SÝKORA, M., M. HOLICKÝ a J. KREJSA. Model Uncertainty for Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams with Shear Reinforcement According to EN 1992-1-1. *Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava. Civil Engineering Series*. Vol. XIII, Issue 2, pp. 150–159 (10 p), ISSN (Online) 1804-4824, ISSN (Print) 1213-1962, DOI: 10.2478/tvsb-2013-0022, 2013.
- [22] VOŘECHOVSKÁ, D. a B. TEPLÝ. Limit states of RC structures: Reinforcement corrosion, reliability and modelling. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013*, pp. 2117-2128 (12 p), ISBN: 978-849410041-3, 2013.
- [23] VOŘECHOVSKÝ, M. Extension of sample size in Latin Hypercube Sampling - Methodology and software. In: *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems - Proceedings of the 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2012*. pp. 2403-2410 (8 p). ISBN: 978-041562126-7, 2012.
- [24] VROUWENVELDER, A.C.W.M. Developments towards full probabilistic design codes. *Structural Safety*, Vol. 24, Issue 2–4, pp. 417-432 (16 p), ISSN 0167-4730, DOI: 10.1016/S0167-4730(02)00035-8, 2012.
- [25] VROUWENVELDER, T. The JCSS probabilistic model code. *Structural Safety*. Vol. 19, Issue 3, pp. 245-251 (7 p). ISSN 0167-4730, 1997.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Juraj Králík, PhD., Katedra stavebnej mechaniky, Stavebná fakulta, STU v Bratislave.

Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D., Oddělení spolehlivosti konstrukcí, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze.