

# STANOVENÍ HYDRODYNAMICKÉHO ZATÍŽENÍ PŘELÉVANÉ MOSTOVKY POMOCÍ 2D NUMERICKÝCH SIMULACÍ

QUANTIFICATION OF HYDRODYNAMIC LOAD ON OVERFLOWED BRIDGE DECK USING 2D NUMERICAL SIMULATIONS

Ing. Michal Pavlíček; Ing. Miroslav Špano, Ph.D.; doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

## ABSTRAKT

Článek popisuje stanovení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky, které je způsobeno prouděním vody v jejím okolí. Kvantifikace tohoto zatížení je důležitým vstupem pro statické posouzení mostní konstrukce v případech, kdy nelze vyloučit, že hladina v korytě toku dosáhne minimálně úrovně spodní hrany mostovky. V tomto případě bylo pro stanovení hydrodynamického zatížení využito modelu proudění vody s volnou hladinou ve 2D vertikální rovině, pro jehož numerické řešení byl využit software ANSYS Fluent 15.0. Pro zohlednění turbulencí proudu byl aplikován standardní k-ε model. Výsledkem výpočtů jsou hodnoty horizontální silové složky hydrodynamického zatížení působící na mostovku a z ní odvozené hodnoty tvarového součinitele. Dosažené výsledky byly porovnány s již provedenými měřeními na fyzikálním modelu a s výsledky publikovanými v dostupné literatuře.

**Klíčová slova:** ANSYS Fluent, 2D numerická simulace, hydrodynamické zatížení, přelévaná mostovka, tvarový součinitel.

## ABSTRACT

The article describes quantification of hydrodynamic load of overflowed bridge deck. The load is caused by water flow around a bridge deck. Quantification of the load is an important input to assessment of a bridge deck stability when water level in a river channel reaches a lower edge of a bridge deck. Solution was pursued by using 2D numerical simulation of open channel flow in vertical plane created in ANSYS 15.0 software. Standard k-ε turbulence model was used. Values of drag force and drag coefficient is result of computation. The article provides comparison of numerical simulation with physical experimental testing and result published in accessible resources.

**Key words:** ANSYS Fluent, 2D numerical simulation, hydrodynamic load, overflowed bridge deck, drag coefficient

## 1 ÚVOD

Dle normy ČSN 73 6201 [3] se mosty křižující vodní toky přednostně navrhují tak, aby při převážně se vyskytujících průtocích minimálně ovlivnily proudění v korytě. Snahou je, aby mosty spodní stavbou neovlivnily průtok v korytě odpovídající návrhovým parametrům koryta. Hlavní parametry ovlivňující návrh tvaru a velikosti mostního otvoru jsou návrhový průtok (NP - smluvený průtok použitý jako podklad pro návrh vyhovující kapacity mostních otvorů) a kontrolní návrhový průtok (KNP - až 1,5 násobek návrhového průtoku). Pro průchod těchto průtoků mostními otvory se hydrotechnickým výpočtem určují návrhová hladina (NH) a kontrolní návrhová hladina (KNH). Dalším návrhovým parametrem je minimální volná výška nad hladinou (MVV), která určuje nejmenší přípustnou svislou vzdálenost mezi NH nebo KNH a nejnižším místem konstrukce mostního objektu.

Aktualizací normy [3] v roce 2008 se nároky ovlivňující rozměry mostního otvoru zvýšily. Požadavek na volnou výšku MVV zůstal stejný, ale byly zvětšeny návrhové průtoky a byl zaveden kontrolní návrhový průtok. Návrhový průtok je dán, podle dopravního významu mostu, dobou opakování (10 až 100 let). Hydrologické údaje však nejsou v čase konstantní a hodnoty průtoků s dlouhou dobou opakování se v poslední době mnohdy zvýšily. Pokud není možná úprava nivelety stávající dráhy či pozemní komunikace, jsou projektanti vystaveni pozici, kdy při návrhu mostního objektu nemohou normové požadavky na dodržení MVV splnit. Norma [3] v tomto případě umožňuje navrhnout mostní objekt tak, aby nebyla zmenšena jeho dosavadní kapacita. Pomocí hydrotechnického výpočtu je nutno stanovit průběh hladiny při průchodu povodně a vliv vzduť způsobené mostovkou na vodohospodářské objekty, pozemky a stavby v úseku toku nad mostem. Ke zlepšení situace v profilu mostu mohou vést úprava tvaru rekonstruované mostovky do hydraulicky vhodného tvaru a osazení zařízení pro zachycení plovoucích předmětů, a to při relativně nízkých investičních nákladech oproti úpravě nivelety dráhy či pozemní komunikace. Pro definované podmínky je cílem konstrukčně omezit účinky hydrodynamického zatížení při přelévání mostovky, tak aby bylo dosaženo statického zabezpečení mostu proti odplavení.

Stanovení hydrodynamického zatížení obtékaných těles se všeobecně popisuje v učebnicích hydrauliky, např. [2]. Zatížení v podobě odporové síly působící proti směru proudění se zde vyjadřuje odporovým součinitelem stanoveným za předpokladu, že přítomnost stěn koryta ani volná hladina neovlivňují proudění v okolí obtékaného tělesa.

V normě ČSN 75 0250 [4] jsou uvedeny doporučené hodnoty odporových součinitelů pro běžné tvary obtékaných těles. Pro tělesa složitějšího tvaru se dle [4] doporučuje stanovit tyto hodnoty experimentálně.

## 2 METODY ŘEŠENÍ

### 2.1 Hydrodynamické zatížení přelévání mostovky

Hydrodynamické zatížení je uvažováno jako změna namáhání konstrukce oproti stavu, kdy je kapalina v klidu. Při proudění skutečné kapaliny okolo konstrukce mostovky působí od vody na konstrukci tlakový odpor (výsledný silový účinek normálových napětí působících na obtékaný povrch mostovky) a třecí odpor (výsledný silový účinek tečných napětí působících na obtékaný povrch mostovky). Normálové napětí působící na obtékaný povrch mostovky je způsobeno tlakem proudící kapaliny. Tečné napětí vzniká vlivem tření proudící kapaliny o povrch tělesa. Vlivem viskozity kapaliny je u stěn obtékaného tělesa nulová rychlost (kapalina přilne k povrchu) a se vzdáleností od povrchu tělesa se rychlost zvyšuje. Dle Prandtlů [2] se v okolí povrchu tělesa vyskytuje tzv. mezní vrstva, ve které vzniká značné tečné napětí. Mimo mezní vrstvu je vliv viskozity kapaliny zanedbatelný [8].

Výsledný silový účinek hydrodynamického zatížení ve směru proudu kapaliny působícího na obtékanou mostovku lze vyjádřit pomocí bezrozměrného tvarového součinitele  $C_D$ :

$$C_D = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 b s} \text{ pro } h^* \geq 1 \text{ a } C_D = \frac{2F_x}{\rho_w v^2 b (h_u - h_b)} \text{ pro } h^* < 1, \quad (1)$$

$$h^* = \frac{h_u - h_b}{s}, \quad (2)$$

kde  $C_D$  je tvarový součinitel horizontální složky hydrodynamického zatížení,  $F_x$  horizontální složka hydrodynamické síly působící v těžišti mostovky,  $\rho_w$  hustota vody,  $v$  střední průřezová rychlost před mostem,  $b$  délka mostu,  $s$  výška mostovky,  $h^*$  relativní zaplavení mostovky,  $h_u$  hloubka vody před mostem,  $h_b$  výška spodní hrany mostovky nade dnem.

Ze vztahu (1) je patrné, že velikost hydrodynamického zatížení přelévané mostovky ovlivňují zejména tvar konstrukce mostovky a drsnost povrchu mostovky (vyjádřen tvarovým součinitelem  $C_D$ ), úroveň zaplavení mostovky (vyjádřeno relativním zaplavením mostovky  $h^*$ ), hustota kapaliny  $\rho_w$  (uvažována konstantní hodnota odpovídající hustotě vody), rychlost proudění kapaliny (vyjádřena bezrozměrným Froudovým kritériem  $Fr$  pro proudění před mostem):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh_u}}, \quad (3)$$

kde  $v$  je střední průřezová rychlost před mostem,  $g$  tíhové zrychlení a  $h_u$  hloubka vody před mostem.

Jednou z možností, jak stanovit hodnotu tvarového součinitele  $C_D$  je výpočet pole napětí (normálového  $p$  a tečného  $\tau$ ) po obvodu obtékané mostovky pomocí numerických simulací. Integrací tohoto pole napětí lze určit hodnota horizontální složky hydrodynamického zatížení působící v těžišti mostovky  $F_x$ . S využitím vztahu (1) lze potom stanovit hodnotu tvarového součinitele  $C_D$ .

## 2.2 Matematický model

Pro řešení dané problematiky byl sestaven 2D vertikální model turbulentního proudění vody s volnou hladinou. Vliv turbulencí na vlastnosti proudění byl modelován standardním  $k$ - $\varepsilon$  modelem. Volná hladina byla trasována pomocí metody VOF (Volume of Fluid) [1].

### 2.2.1 Zjednodušující předpoklady

Byl zaveden předpoklad ustáleného proudění (při aplikaci metody VOF pro nalezení volné hladiny je doporučeno aplikovat model neustáleného proudění s dostatečně dlouhou dobou simulace tak, aby výpočet konvergoval do ustáleného stavu), dno náhradní oblasti a mostovka byly uvažovány v konkrétních rozměrech s hladkou stěnou a bylo uvažováno neprovzdušněné proudění nestlačitelné kapaliny s konstantní viskozitou.

### 2.2.2 Formulace problému

Řešení úlohy turbulentního proudění ve smyslu Reynoldsova pojetí turbulence spočívá v nalezení 6 neznámých veličin, kterými jsou střední hodnoty složek vektoru rychlosti  $v_x$  a  $v_y$ , střední hodnota tlaku  $p$ , kinetická energie turbulence  $k$ , disipace kinetické energie turbulence  $\varepsilon$  a objemová frakce  $F$  [1], [8].

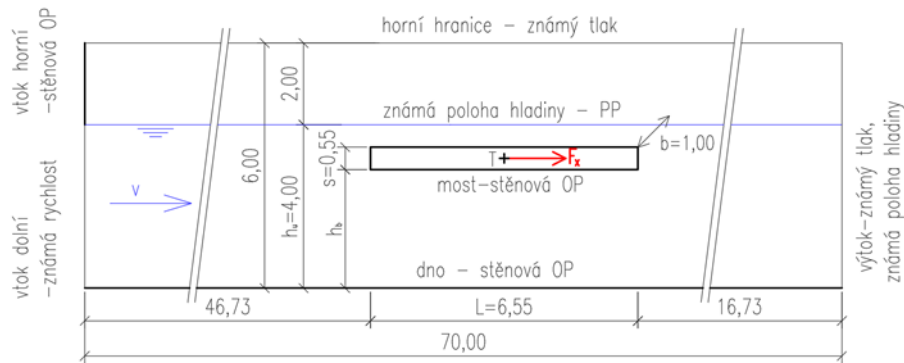
Matematický model popisující řešené proudění sestává z rovnic vyjadřujících zákony zachování hmotnosti (rovnice kontinuity) a hybnosti (Navier - Stokesovy rovnice), které jsou doplněny o dvě rovnice  $k$ - $\varepsilon$  modelu turbulence, rovnici metody VOF (hledání hladiny) a konstitutivní vztahy [1], [8].

Řídící rovnice matematického modelu je nutno doplnit počátečními podmínkami (PP), které popisují stav v čase  $t = 0$  a okrajovými podmínkami (OP), které udávají hodnoty neznámých veličin na hranicích náhradní oblasti (Obr. 1).

## 2.3 Numerické řešení

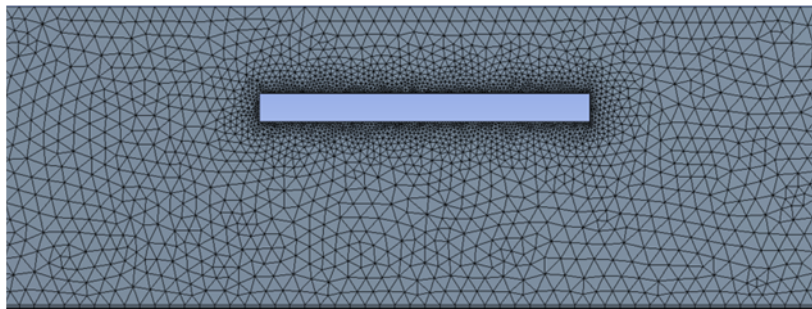
Numerický model byl vytvořen pomocí komerčně dostupného programového balíku ANSYS 15.0 (moduly Workbench, Design Modeler, Meshing a Fluent), vlastní numerické simulace byly provedeny v programu ANSYS Fluent 15.0, který používá pro řešení řídicích rovnic metodu konečných objemů.

Rozměry náhradní oblasti byly voleny tak, aby OP na hranicích neovlivňovaly proudění okolo mostovky. Délka přítokové části náhradní oblasti byla volena 46,73 m (2/3 celkové délky náhradní oblasti), aby byl eliminován vliv zadané konstantní rychlosti na vtoku a zajištěn ustálený tvar rychlostního profilu před mostní konstrukcí. Geometrie náhradní oblasti, OP a PP jsou patrné z Obr. 1.



**Obr. 1 Geometrie náhradní oblasti s vyznačením počátečních (PP) a okrajových (OP) podmínek a kladné konvence horizontální složky hydrodynamického zatížení  $F_x$**

Náhradní oblast byla prostorově diskretizována výpočtovou sítí trojúhelníkových prvků. Velikost prvků byla volena s ohledem na celkové rozměry oblasti, na přesnost výpočtu a nároky na výpočtový čas. Velikost prvků se pohybuje od 0,05 do 0,5 m. Dále byla na dně oblasti a na povrchu mostovky vytvořena vrstva prvků „inflation“, která zohledňuje vliv mezní vrstvy při obtékání konstrukce mostovky. Na Obr. 2 je zobrazena diskretizace náhradní oblasti v okolí mostovky, tato oblast je stěžejní pro stanovení hydrodynamického zatížení.



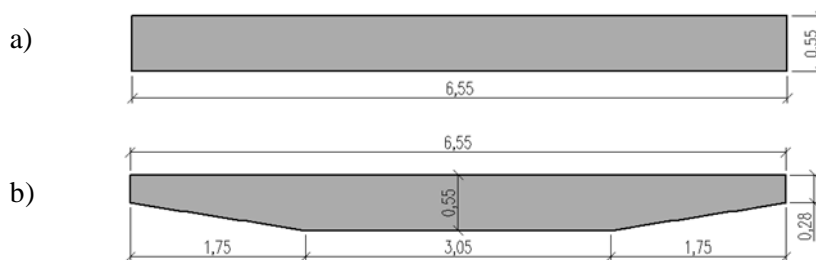
**Obr. 2 Detail diskretizace náhradní oblasti v okolí mostovky**

Velikost časového kroku byla volena  $\Delta t = 1.10^{-4}$  s pro prvních 1000 časových kroků a pro následující kroky byla dle doporučení v [1] nastavena proměnná hodnota časového kroku s podmínkou maximální hodnoty globálního Courantova kritéria  $Cu \leq 2,0$ . Při tomto nastavení výpočet konvergoval k ustálenému řešení. Dosažení ustáleného proudění bylo uvažováno po simulaci 1000 s proudění se stejnými okrajovými podmínkami.

Verifikace modelu spočívala v porovnání dosažených výsledků numerických simulací s daty naměřenými na fyzikálním modelu zmenšeném v měřítku 1:12,5.

## 2.4 Modelované scénáře

Celkem bylo simulováno 18 scénářů. Byly uvažovány 2 varianty příčných řezů mostovkou (viz Obr. 3). Pro každou variantu příčného řezu byly simulovány 3 úrovně zaplavení mostovky, (charakterizovány relativním zaplavením mostovky  $h^*=0,5; 1,0; 2,0$ ) a 3 hodnoty přítokové rychlosti (charakterizovány Froudovým kritériem na vtoku  $Fr=0,22; 0,27; 0,32$ ). Rozsah  $Fr$  byl zvolen s ohledem na situace, které mohou nastat při aplikaci v praxi a zároveň s ohledem na možnosti fyzikálního modelování a limity hydraulického okruhu laboratoře. Rozsah zvolených hodnot relativního zaplavení  $h^*$  pokrývá většinu praktických aplikací na mostech, pro které může být výhodné konstrukčně omezit účinky hydrodynamického zatížení.



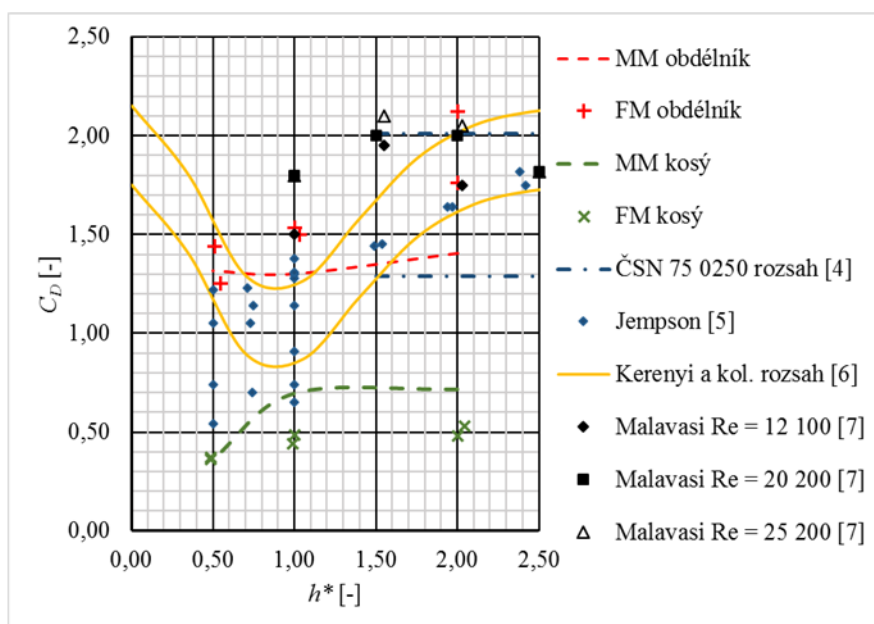
Obr. 3 Varianty uvažovaných příčných řezů mostovkou: a) varianta 1 – obdélníkový most, b) varianta 2 – kosý most

### 3 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Hodnoty tvarového součinitele  $C_D$  získaného zpracováním výsledků numerických simulací byly porovnány s hodnotami získanými zpracováním měření na fyzikálním modelu zmenšeném v měřítku 1:12,5. Dále byly hodnoty tvarového součinitele vypočteného pro variantu 1 příčného řezu mostovkou (obdélníkový most) porovnány s hodnotami tvarových součinitelů těles tvarem a rozměry mostu nejvíce podobných, které byly publikovány v dostupné literatuře [4], [5], [6] a [7].

Na Obr. 4 jsou vyneseny hodnoty tvarového součinitele  $C_D$  v závislosti na relativním zaplavení získané vyhodnocením výsledků numerických simulací (MM), hodnoty získané zpracováním naměření na fyzikálním modelu (FM) a hodnoty získané z dostupné literatury [4], [5], [6] a [7].

U výsledků MM není patrný vliv různých hodnot Froudova kritéria  $Fr$ , tudíž byly pro každou variantu vykresleny průměrné hodnoty tvarového součinitele  $C_D$ .



Obr. 4 Porovnání hodnot tvarového součinitele  $C_D$  získaných vyhodnocením numerických simulací s hodnotami měřenými na fyzikálním modelu a z dostupné literatury v závislosti na relativním zaplavení mostovky  $h^*$

Na základě porovnání výsledků lze konstatovat poměrně dobrou shodu mezi výsledky MM a FM. Dále je z těchto výsledků patrný pozitivní vliv kosého tvaru mostovky, kde lze na základě hodnot  $C_D$  očekávat snížení namáhání horizontální složkou  $F_x$  o více než 50 %. Na základě kvalitativního porovnání výsledků lze konstatovat velmi dobrou shodu mezi výsledky MM a výsledky z ostatních

zdrojů [4], [5], [6] a [7]. Pozorované rozdíly jsou zřejmě způsobeny rozdílnými tvary příčných řezů mostovkou.

## 4 ZÁVĚR

Výsledky numerických simulací jsou zatíženy nejistotami plynoucími především z přijatých zjednodušujících předpokladů, aplikace OP, volby modelu turbulence, parametrů výpočtové sítě apod. Na základě porovnání s výsledky fyzikálního modelování a informacemi publikovanými v dostupné literatuře lze v uvedených případech tyto nejistoty odhadnout v řádu 10 až 20 %.

Na základě statistického zpracování hodnot horizontální složky hydrodynamického zatížení (síly  $F_x$ ) vypočtené v každém časovém kroku simulace byla kvantifikována nejistota numerického výstupu na  $\pm 1,5$  % hodnoty  $F_x$ . Maximálního poměr 5 a 95 procentního kvantilu vypočtené síly  $F_x$  je 1,04. Na základě těchto výsledků lze minimální čas simulace lze doporučit 500 s a pro další zpracování použít výsledky z posledního časového kroku.

Na základě porovnání výsledků numerických simulací s fyzikálním modelem a s dostupnou literaturou lze konstatovat, že numerickou simulaci je možno použít pro stanovení střední hodnoty hydrodynamického zatížení přelévané mostovky a pro předběžnou optimalizaci tvaru mostovky. Výsledný návrh je však vhodné ověřit měřeními na fyzikálním modelu.

Na základě zkušeností získaných při realizaci numerických simulací a z vyhodnocení dosažených výsledků lze doporučit, aby se další výzkum zaměřil především na otázky týkající se rozšíření simulovaných scénářů, nastavení OP turbulence proudu na vtoku a výtoku v závislosti na Reynoldsově kritériu, vlivu volby modelu turbulence, vlivu drsnosti obtékané stěny a tlakových pulsací pozorovaných na výsledné hydrodynamické zatížení.

### Poděkování

Příspěvek byl zpracován za podpory projektů Specifického výzkumu VUT v Brně č. FAST-J-16-3692 „Hodnocení nejistot při 2D numerickém modelování proudění vody v záplavových územích“ a č. FAST-S-15-2843 „Hydrodynamické zatížení mostních konstrukcí při povodňových průtocích.“

### Použitá literatura

- [1] ANSYS *FLUENT Theory Guide, Release 15.0*. ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylv., 2013
- [2] Boor, B., Kunštátský J., Patočka C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby: celost. učebnice pro vys. školy*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1968, 516 s.
- [3] ČSN 73 6201. *Projektování mostních objektů*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [4] ČSN 75 0250. *Zásady navrhování a zatížení konstrukcí vodohospodářských staveb*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [5] Jempson, M. *Flood and Debris Loads on Bridges*. The University of Queensland, Civil Engineering Department, 2000.
- [6] Kerenyi, K., Sofu, T., Guo, J., Bushra, A. *Hydrodynamic Forces on inundated bridge decks*. Report No. FHWA-HRT-09-028. 2009.
- [7] Malavasi, S., Guadagnini, A. *Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow*. Journal of Fluids and Structures. November 2007.
- [8] Pavlíček, M. *Stanovení hydrodynamického zatížení přelévané mostovky s využitím 2D numerických simulací*. Dipl. práce. Ústav vodních staveb FAST VUT v Brně. Brno, 2016.