

Simulace proudění v porézním prostředí se zaměřením na puklinová prostředí

Anežka Švandová¹

1 Úvod

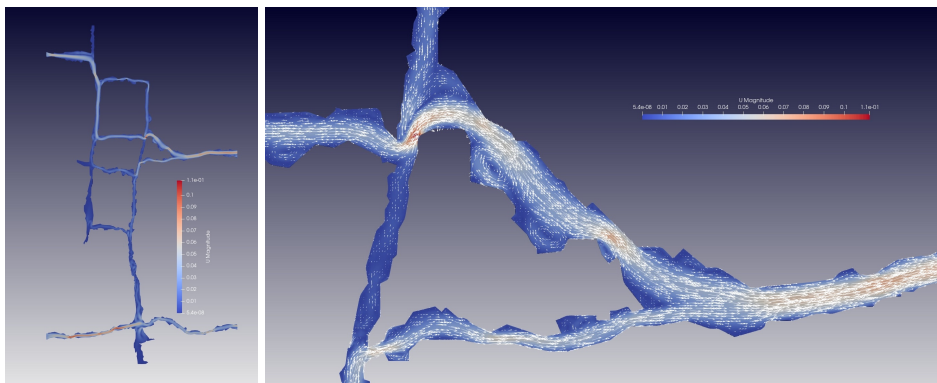
Proudění podzemní vody ve zvodni s volnou hladinou lze matematicky popsat (viz např. monografie Bear (1972) a Harr (1991)) pomocí následující parciální diferenciální rovnice

$$n \frac{\partial h}{\partial t}(x, y, t) - \operatorname{div}(h(x, y, t) \vec{q}) = f(x, y, t), \quad (1)$$

$$\text{zde } \vec{q} \text{ je tok, } \vec{q} = \vec{0} \text{ pro } \nabla h = \vec{0} \text{ a } \vec{q} = -\Phi(|\nabla h|) \frac{\nabla h}{|\nabla h|} \text{ pro } \nabla h \neq \vec{0}, \quad (2)$$

h je výška hladiny podzemní vody měřená od referenční hladiny, n je porozita prostředí, f vyjadřuje vnější příspěvek k bilanci podzemní vody (srážky/výpar) a funkce Φ v rov. (2) vyjadřuje konstitutivní vztah mezi tokem podzemní vody a spádem její hladiny. Tento konstitutivní vztah se určuje především experimentálně pro dané porézní prostředí. V případě puklinového prostředí je tento postup velmi obtížný, proto je pro stanovení tohoto vztahu vhodnější použít numerické simulace proudění v puklinách pomocí Navierových-Stokesových rovnic případně vhodně zvolených modelů turbulence, viz např. Xing et al. (2021)

2 Postup řešení a metodika



Obrázek 1: Proudové pole získané simulací proudění pomocí Navierových-Stokesových rovnic v systému puklin (vlevo). Detail proudového pole v křížení puklin (vpravo).

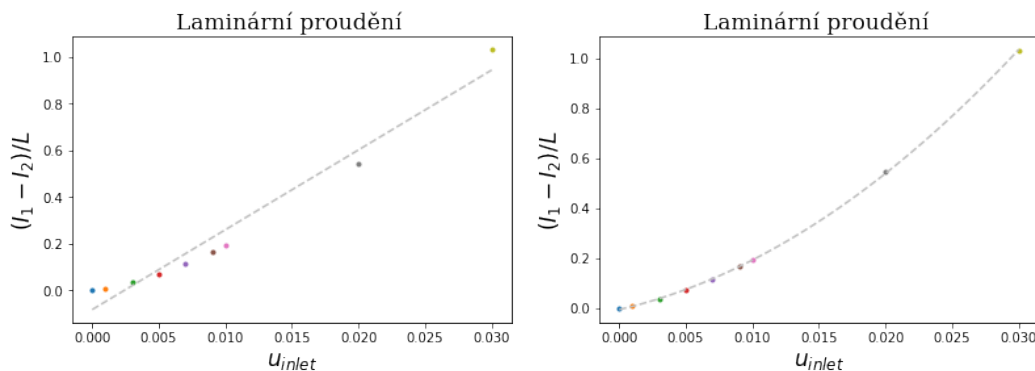
V konstitutivním vztahu (2) se vyskytuje hydraulický gradient, který lze jednoduchým vztahem přepočítat na gradient tlaku a naopak. V numerických simulacích je přirozenější pracovat s gradientem totálního tlaku a vstupní rychlostí vody do systému puklin místo toku (opět lze snadno vzájemně převádět). Proto je v následujícím textu stanovena závislost gradientu totálního tlaku na vstupní rychlosti. Numerické simulace byly provedeny v prostředí OpenFoam, jež je sada nástrojů C++ pro řešení úloh mechaniky kontinua především z oblasti dynamiky tekutin.

¹ student navazujícího studijního programu Matematika a její aplikace, e-mail: svandova@students.zcu.cz, vedoucí diplomové práce a mentor projektu: P. Girg.

V prvním kroku je vytvořen geometrický 3D model systému puklin a následně vygenerována výpočetní síť pro metodu konečných objemů, kterou OpenFoam využívá. K tomuto účelu byl zvolen program 3D Sharp. Výsledná síť je pak použita v systému OpenFoam. Simulace proudění jsou prováděny pro různé škály vstupních rychlostí proudící vody a výsledná data jsou následně zpracovávána pomocí Pythonu.

OpenFoam viz (OpenFOAM: User Guide [online]) má rozsáhlou knihovnu pro simulace laminárního i turbulentního proudění. V simulacích je (dle Reynoldsova čísla) volena přímá simulace pomocí Navierových-Stokesových rovnic, nebo RAS modely (tj. Reynolds-averaged simulation).

3 Výsledky a shrnutí



Obrázek 2: Data získaná numerickou simulací proložená lineárním (vlevo) a kvadratickým polynomem (vpravo).

Výše uvedeným postupem byla zjištěna závislost gradientu totálního tlaku na vstupní rychlosti pro daný systém puklin pro různé režimy proudění. Např. v laminárním režimu proudění byl při proložení lineárním polynomem získán konstitutivní vztah (Darcyho typu): $(l_1 - l_2)/L = -0.082 + 34.237 u_{inlet}$ a při proložení kvadratickým polynomem získán konstitutivní vztah (Forchheimerova typu): $(l_1 - l_2)/L = -0.005 + 12.372 u_{inlet} + 742.502 u_{inlet}^2$. Z Obrázku 2 je patrné, že konstitutivní vztah Forchheimerova typu lépe prokládá data zjištěná simulací.

Dále byly provedeny též numerické simulace pro vyšší vstupní rychlosti s uvažováním $k-\omega$ SST RANS modelu turbulence. Tímto způsobem byly obdrženy výsledky pro konstitutivní vztahy i v případě turbulentního proudění.

Poděkování

Autorka děkuje za podporu proj. GAČR 22-18261S “Nelineární úlohy s nestandardní difuzí”.

Literatura

- [1] Bear, J., 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media, Enviromental science series*. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York.
- [2] Harr, M., 1991. *Groundwater and Seepage, Dover Civil and Mechanical Engineering Series*, Dover Publications, Inc., New York.
- [3] OpenFOAM: User Guide [online]. Dostupné z <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/>
- [4] Xing, K., Qian, J., Zhao, W., Ma, H., Ma, L., 2021. Experimental and numerical study for the inertial dependence of non-Darcy coefficient in rough single fractures. *Journal of Hydrology*, 603, Part D, Article Id. 127148.