

Numerická metóda určenia hydraulickej vodivosti vodou nasýteného pórovitého prostredia obsahujúceho kamene.

Ing. Viliam Novák, DrSc.

, Ústav hydrológie, Slovenská akadémia vied, Dúbravská cesta 9, 84104 Bratislava

E-mail: viliamnovak42@gmail.com Tel< +421910259679

Abstrakt.

19. novembra 2004 vo Vysokých Tatrách vyčíňala smršť. Rýchlosť vetra dosahovala viac ako 200 kilometrov za hodinu a spôsobila polom na ploche viac ako 12600 hektárov lesa. Vyvrátila asi 3 milióny stromov (2,5 milióna metrov kubických dreva) a nadhlo zmenila výzor Vysokých Tatier. Vynorila sa otázka: ako ovplyvní tento polom dynamiku vody vo V. Tatrách? Čo sa stane s vodnými tokmi, zvýši sa riziko prívalových povodní, keďže sa zníži plocha lesov, ktoré sú pri evapotranspirácii dominantné? Preto bol realizovaný projekt APVV č. 51-030205 „Vplyv polomu na režim vody vo V. Tatrách“, aby sa kvantitatívne posúdil vplyv zmien vlastností vegetačného krytu na režim vody vo V. Tatrách. Počas prieskumných prác sa ukázalo, že pôdy v oblastiach polomu obsahujú veľký podiel kameňov (skalnaté pôdy) a ich vlastnosti sa významne líšia od zrnitostne homogénnych pôd. Aké to bude mať dôsledky pre režim vody vo V. Tatrách? Ukázalo sa, že štandardné metódy merania hydrofyzikálnych charakteristík používané v pôdach bez významného výskytu kameňov, sa v skalnatých pôdach nedajú použiť. Preto bola v Ústave hydrológie SAV navrhnutá originálna metóda numerickej simulácie prúdenia vody v skalnatých pôdach (tzv. Darcyho pokusu), ktorá je opísaná v tomto príspevku. Výsledkom numerickej simulácie transportu vody vo virtuálnych vzorkách skalnatých pôd boli hodnoty súčiniteľov hydraulickej vodivosti pôd obsahujúcich kamene, ktoré boli použité v simulačných modeloch, pomocou ktorých bol vypočítaný vplyv polomu na vodný režim V. Tatier. Ukázalo sa, že úlohu stromových porastov (intercepcia, transpirácia) čiastočne prevzali nízke porasty, ktoré na miestach polomu nahradili stromy. Kamene v lesných pôdach znížili ich hydraulickú vodivosť, ale jemnozernosťou medzi kameňmi sama o sebe mala dosť vysokú hydraulickú vodivosť, aby previedla zrážkovú vodu do podzemných vôd. Výsledkom bolo, že povrchový odtok, ktorý môže sformovať eventuálnu povodeň sa významne nezmenil a zmeny režimu vody v pôdach V. Tatier ktoré vznikli ako dôsledok polomu neboli významné. Je to spôsobené špecifikami Tatier zo zriedkavým výskytom extrémnych zrážkových udalostí. V podmienkach stredomoria (viď príklad Dalmácie, kde v čase Rímskej ríše, bolo holorubmi vyťažené drevo bolo použité na stavbu lodí), čo viedlo k extrémnej erózii a odnosu pôdy. Výsledkom je obnažené skalné podložie. Také riziko našim veľhorám nehrozí.

Kľúčové slová: kamenité pôdy, hydraulická vodivosť pôd, výpočtová technika, simulácia prúdenia cez skalnaté pôdy

Ústav hydrológie SAV

Ústav hydrológie Slovenskej akadémie vied bol založený v roku 1953 ako Vodohospodárske laboratórium SAV. Jeho založenie bolo reakciou na potreby vodohospodárskej praxe, ktorá bola charakterizovaná výstavbou vodných diel na Slovensku. Bola tu evidentná potreba pochopiť a kvantifikovať pohyb vody v prírodných podmienkach Slovenska a to komplexne, teda nielen transport vody v tokoch, ale aj pohyb povrchových a tiež podpovrchových (podzemných a pôdných) vôd. To bol impulz pre založenie ústavu v rámci SAV. Spomenuté Vodohospodárske laboratórium SAV zmenilo názov na Ústav hydrológie a hydrotechniky

SAV (1959); neskôr na Ústav hydrológie a hydrauliky SAV (1963) a nakoniec (1991) na Ústav hydrológie SAV, čo lepšie charakterizovalo súbor činností tohoto ústavu. Vedecko – výskumná činnosť Ústavu hydrológie sa koncentrovala na dynamiku vody v prírode. Hydrotechnika a hydraulika prestala byť v centre záujmu; na tú sa sústredili iné inštitúcie (STU, VÚVH). Preto boli konštituované dve vedecké oddelenia: Oddelenie hydrológie povrchových vôd a Oddelenie hydrológie podpovrchových vôd (OHPPV). V rámci OHPPV sa realizoval výskum, ktorý je obsahom tohoto príspevku.

Čo je to hydrológia ?

Hydrológia (z gr. *hydros* - voda, *logos* - náuka, veda) je vedná disciplína, zaoberajúca sa vodou na Zemi vo všetkých jej skupenstvách. Skúma zákonitosti časového a priestorového rozdelenia a obehu vody na Zemi (tzv. vodný cyklus) a jej fyzikálne, chemické a biologické vlastnosti. Dôraz sa kladie na pohyb vody v prírode a kvantitatívne vyjadrenie vplyvu vlastností prostredia, vrátane antropogénnej činnosti a na kvalitatívne a kvantitatívne vlastnosti hydrosféry. V ďalšej časti sa budeme zaoberať predovšetkým dynamikou podpovrchových vôd, t.j. podzemnej a pôdnej vody. Pórovité prostredia (pôdy a zeminy) sú charakterizované ich hydrofyzikálnymi vlastnosťami, ktoré sú potrebné pre modelovanie dynamiky vody v povodí. Pre ich určenie v skalnatých pôdach nie je možné použiť klasické postupy.

Aké metódy určovania hydrofyzikálnych vlastností pôd sa bežne používali?

Metódy určovania hydrofyzikálnych vlastností pórovitého prostredia (pôd a zemín) boli v minulosti výlučne empirické. Vlhkostné retenčné krivky (závislosti medzi maticným potenciálom vody v pôde a jej vlhkosťou) ako aj hydraulické vodivosti týchto prostredí sa takmer výlučne merali v laboratóriu. V teréne sa používala hlavne metóda čerpacieho pokusu a metóda plnenej sondy, ktoré predpokladajú relatívne homogénne pórovité prostredie. Situácia sa zmenila, keď prišli na rad skalnaté pôdy. Fragmenty hornín (kamene) spôsobili, že na meranie hydrofyzikálnych charakteristík skalnatých pôd bol potrebný reprezentačný elementárny objem, (REV), úmerný veľkosti kameňov v pôde, ktorý bol príliš veľký na laboratórne pokusy. (Pre ilustráciu môžeme uviesť skalnatú pôdu obsahujúcu kamene o priemere 10 cm, čo je v prírode bežné, bol by na meranie potrebný REV s objemom 1 m^3), vážiaci niekoľko ton. A to nehovorím o probléme ako takú vzorku odobrať, doviezť intaktnú do laboratória a zmerať potrebné charakteristiky. Preto sme navrhli metódu numerickej simulácie transportu vody v pórovitých prostrediach. Namiesto fyzikálneho telesa (vzorky pôdy s objemom REV), bolo použité virtuálne pórovité prostredie. V dekáde 2000 – 2010 už bola k dispozícii výkonná výpočtová technika, ktorá umožňovala tieto simulácie.

Skalnatými pôdami alebo zeminami (zeminy sú pórovité prostredia, ktoré nemôžu byť prostredím pre rastliny), nazývame pórovité prostredia, obsahujúce kamene. Samotné kamene sú v podstate pre vodu nevodivé a svojou prítomnosťou znižujú podiel vodivého, jemnozrnného podielu pôdy, čím sa výrazne znižuje hydraulická vodivosť a retencia skalnatých pôd. Transportu vody v takýchto prostrediach sa u nás nikto nezaoberal, treba podotknúť, že aj v zahraničí sa tomuto javu venovala len malá pozornosť a keď, tak čiste z kvalitatívneho hľadiska. Všetka pozornosť sa sústredila na poľnohospodárske pôdy, ktoré spravidla bolo možno považovať za relatívne homogénne.

Počas riešenia horeuvedených projektov po polome vo V. Tatrách (po roku 2004), sme konštatovali, že nie je možné použiť štandardné metódy merania hydrofyzikálnych charakteristík skalnatých pôd. Na otázku (TANAP), či boli nejako zisťované vlastnosti

skalnatých pôd, napríklad podiel kameňov v pôde (stoniness), dostali sme odpoveď, že sa to nedá. Samozrejme sa dalo, zrealizovali sme to aj keď s veľkým úsilím. To však nestačilo na určenie hydraulickej vodivosti skalnatej pôdy. Preto sme navrhli metódu modelovania prúdenia vody vo virtuálnych (modelových) pórovitých prostrediach, kde bolo možné voliť veľkosť, tvar a rozloženie fragmentov hornín v homogénnej jemnozemi s využitím matematického modelu pórovitého prostredia. Ako bude uvedené neskôr, takto vypočítané hydraulické vodivosti skalnatých pôd boli použité ako vstupné hodnoty do matematických modelov transportu vody v skalnatých pôdach a ku kvantifikácii vplyvu kameňov v pôdach na režim vody vo V. Tatrách.

Projekty, v rámci ktorých bol realizovaný predmetný výskum

APVV č. 51-030205 „Vplyv polomu na režim vody vo V. Tatrách“, Projekt VEGA 2/0032/13, Projekt ITMS 262401200004, podporený RDOP a financovaný ERDF.

Riešitelia

Ing. V. Novák, DrSc., Ing. K. Kňava, PhD., Ing. H. Hlaváčiková, PhD., prof. Ing. J. Šimůnek, PhD. (University of California, Riverside, USA), RNDr. L. Holko, PhD., Ing. M. Danko, PhD. Vedúcim projektu a iniciátorom použitia metódy matematického modelovania transportu vody v skalnatej pôde bol Ing. V. Novák, DrSc. Numerické metódy vyvinuli a realizovali prof. Ing. J. Šimůnek a Ing. K. Kňava, PhD a o ich aplikáciu pri modelovaní transportu vody v lesných pôdach sa zaslúžili Ing. H. Hlaváčiková, PhD., RNDr. L. Holko, PhD, a Ing. M. Danko, PhD.

Úvod do problematiky

Pojmom pórovité prostredie označujeme sústavu zloženú v pevnej, dispergovanej fázy; medzi časticami pevnej fázy sa nachádzajú póry, ktoré môžu obsahovať vzduch, alebo vodu. Najčastejším pórovitým prostredím je pôda. Častice pôdy tvoriace pevnú fázu sú spravidla menšie ako 2 milimetre, sú to teda také častice, ktoré prejdú sitom s rozmerom ôk 2 mm; takáto pôda sa nazýva jemnozemia a je spravidla v poľnohospodárskych pôdach dominantná. Rozmerom pevných častíc spravidla zodpovedajú rozmery pórov, ktoré sú spravidla menšie ako rozmery pevných častíc. Póry obsahujú vodu aj vzduch; obe zložky sú potrebné pre fotosyntézu a dýchanie rastlín. Technické prostriedky, ktorými sa merajú tzv. hydrofyzikálne charakteristiky pôd (potrebné pre výpočet transportu vody, vzduchu, živín a energie v pôde) sú vhodné pre jemnozemia, t.j. pre pôdy (pórovité prostredia) obsahujúce častice pevnej fázy menšie ako 2 mm.

Avšak, hlavne lesné pôdy obsahujú značné množstvo kameňov, t.j. pevných častíc väčších ako 2 mm. (v Západnej Európe je tzv. skalnatých pôd až 30%, na Slovensku je až 80% lesných pôd a 47% poľnohospodárskych pôd označených ako skalnaté pôdy). Skalnaté pôdy, pretože obsahujú relatívne veľké kamene, ktoré sú prakticky nevodivé pre vodu a majú extrémne nízku retenčnú kapacitu pre vodu, majú zníženú hydraulickú vodivosť a teda obmedzujú poľnohospodársku činnosť. Ďalším problémom je meranie ich hydrofyzikálnych charakteristík, potrebných pre výpočet dynamiky vody v pôde. Problém spočíva v tom, že vzorka pôdy (pórovitého prostredia) musí byť väčšia, ako tzv. reprezentatívny elementárny objem (REV), aby aj samotné meranie mohlo byť reprezentatívne. Pri meraní v laboratóriu sa používajú „neporušené“ vzorky pôdy odoberané do tzv. „kopečkého valčekov“ s objemom 100 cm^3 . Tento objem je postačujúci pre pôdy označené ako jemnozemia.

Ak je pôda skalnatá, potrebný REV sa zväčší. Pri pevnej častici (kamene) o priemere 10 cm je potrebný reprezentatívny objem približne 1 m^3 , čo znamená hmotnosť vzorky pôdy viac ako 1000 kg. Je jasné, že odobrať, dopraviť takúto vzorku do laboratória je ťažko riešiteľný problém, dodnes bol experimentálne zrealizovaný len niekoľkokrát a pre potreby praxe táto cesta nevedie.

Dosiahnuté výsledky

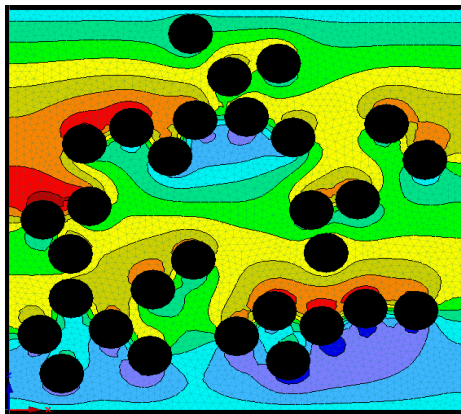
Výsledkom riešenia tejto úlohy boli numericky určené hydraulické vodivosti vodou nasýteného pórovitého prostredia (K) obsahujúceho časti hornín väčšie ako 2 mm (skalnaté pôdy), v závislosti na relatívnom obsahu kameňov (stoniness), na tvare, orientácii a polohe kameňov v jemnozemi (pevné častice menšie ako 2 mm) pôd. Na určenie súčiniteľa vodou nasýtenej hydraulickej vodivosti skalnatých pôd bola použitá numerická verzia klasického experimentu Darcy, čo znamená, že bolo simulované ustálené prúdenie vody cez pórovitý materiál pri jednotkovom hydraulickom gradiente. Na modelovanie bol použitý dvojdimenzionálny (2D) numerický model HYDRUS-2D, v niektorých prípadoch bol použitý aj trojdimenzionálny model HYDRUS-3D. Ako súčasť skalnatej pôdy boli použité tri rozdielne tvary častíc hornín, ktoré simulovali reálne kamene v pôde; pre modelovanie v dvojdimenzionálnom tvare to boli rezy týchto telies: (guľa – kruh, elipsoid – elipsa, ihlan – trojuholník). Relatívne objemy kameňov (stoniness) v modelovej pôde boli v rozmedzí 0,07 – 0,5 (teda až polovicu objemu pórovitého prostredia tvorili kamene). To sa prejavilo v znížení súčiniteľa hydraulickej vodivosti K takýchto pôd (v porovnaní s pôdou obsahujúcou len jemnozeme) v rozsahu od 0,17 K (pre relatívny objem kameňov v pôde 0,5, teda 50%) až po 0,7 K (pre relatívny objem kameňov v pôde 0,07, teda 7%) ak hydraulickú vodivosť skalnatej pôdy porovnáme s vodivosťou jemnozeme, ktorou je K . Kamene v pôde výrazne znižujú K ; platí, že so zvyšujúcim sa obsahom (objemom) kameňov, sa kvázilineárne znižuje hydraulická vodivosť vodou nasýteného pórovitého prostredia.

Použitý model HYDRUS je založený na numerickom riešení parciálnej diferenciálnej rovnice Richardsa, ktorá kvantitatívne opisuje prúdenie vody v pórovitom prostredí, s rozdielnym stupňom nasýtenia. Program bol vytvorený v jazyku FORTRAN. Simulácie prúdenia vody s obsahom kameňov v dvoch dimenziách (model HYDRUS2D) boli realizované na stolnom počítači, simulácie prebehli počas niekoľkých minút. Niekoľko simulácií bolo vykonaných spomocou modelu HYDRUS3D (teda v trojrozmernom prostredí), aby sme porovnali výsledky simulácií v 2D a 3D modeloch. Výsledkom bolo, že rozdiely medzi hodnotami K vypočítanými oboma modelmi boli malé, teda akceptovateľné, preto väčšina simulácií bola vykonaná v dvojrozmernom prostredí. Trojrozmerné simulácie si vyžadovali veľkú pamäť a vysokú rýchlosť výpočtov, takže boli realizované prof. J. Šimůnkom v University of California, Riverside, CA, USA (Radcliffe, Šimůnek, (2010), Novák et al., 2011, Novák, Hlaváčiková, 2019).

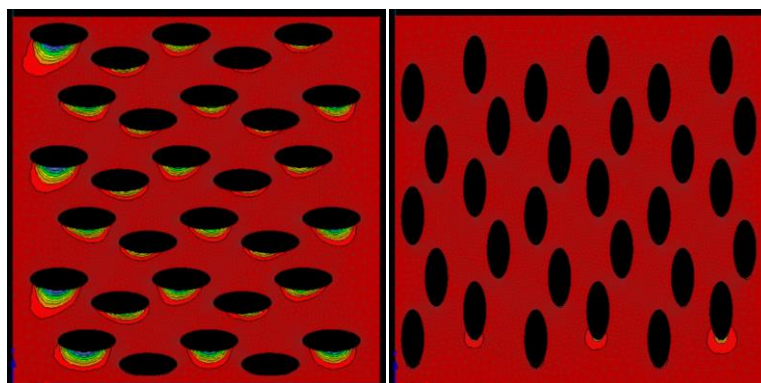
Zaujímavým zistením bolo, že aj počas prúdenia vody cez pôdu pôvodne vodou nasýtenú a so súvislou hladinou vody na povrchu virtuálnej vzorky skalnatej pôdy, sa počas prúdenia vody cez túto vzorku okolo pevných častíc vytvárajú oblasti vodou nenasýtené (obr. 1 a 2), ktoré sa podarilo identifikovať pretože sme použili ako „governing equation“ Richardsovu rovnicu. Empirickými metódami by identifikácia oblastí vodou nenasýtených (a teda s negatívnymi hodnotami maticového potenciálu) nebola možná. Aj tento príklad poukazuje na obrovské možnosti numerických metód pri štúdiu dynamiky tekutín v pórovitých prostrediach.

Výsledky numerických simulácií ukázali, že efektívne hydraulické vodivosti vodou nasýtených sklanatých pôd klesajú úmerne s rastom relatívneho objemu častíc horniny, ale závisia aj od tvaru a orientácie pevných častíc. Najväčšie rozdiely v hodnotách K boli zistené pre kontrastné (horizontálne versus vertikálne) polohy pevných častíc v tvare elipsoidov. Hydraulické vodivosti vodou nasýteného pórovitého prostredia K boli použité pri identifikácii režimu vody v skalnatej pôde a umožnili pochopiť vplyv kameňov na prúdenie vody v skalnatých pôdach a tvorbu odtoku.

Numerické modelovanie transportu vody v skalnatých pôdach umožňuje identifikovať a numericky vyjadriť vplyv charakteristík kameňov (ich objem, tvar a usporiadanie) na hydraulickú vodivosť vodou nasýtenej pôdy, ktorý by nebolo možné zmerať.



Obr.1. Ilustrácia rozdelenia vlhkostí v skalnatej pôde počas počas Darcyho pokusu je výsledok numerickej simulácie vertikálneho prúdenia vody zhora nadol, ktorý je spôsobený rozdielom hladín vody na povrchu vzorky a hladiny vody do korej je spodná časť vzorky ponorená. Virtuálna pôda bola pôvodne nasýtená vodou (červená farba). Ostatné farby reprezentujú nižšie vlhkosti, najnižšiu vlhkosť reprezentuje modrá farba. Nerovnomerne rozdelené kamene v tvare guľ s priemerom 10 cm spôsobujú nerovnomerné rozdelenie vlhkosti v tejto vzorke a výrazne znižujú vodivosť pórovitého prostredia, pretože v takomto prostredí sa v dôsledku existencie nevodivých kameňov vytvárajú oblasti vodou nenasýtené a teda s rádovo nižšími vlhkosťami pôdy, čo znižuje integrálnu hydraulickú vodivosť pórovitého prostredia (REV). Predpokladalo sa, že ak je horná aj dolná plocha vzorky pôdy a pokrytá hladinou vody, póry počas prúdenia budú vodou nasýtené. Nie je však tomu tak. Jediná možnosť, ako získať tieto informácie je simulácia prúdenia vody numerickými metódami.



Obr.2. Ilustrácia rozdelenia vlhkostí v skalnatej pôde počas vertikálneho prúdenia vody zhora nadol pre rozdielne orientácie skalnatých (nepriepustných) častíc v jemnozrnnom pórovitom prostredí. Najväčšie relatívne rozdiely medzi vypočítanými hodnotami K boli až 26% pre kontrastné konfigurácie elipsoidov (pri stálom relatívnom podiele kameňov v pôde 0.24). Na ľavom obrázku je vidieť vodou nenasýtené oblasti pôdy (iná ako červená farba), ktoré majú výrazne nižšiu hydraulickú vodivosť a tak znižujú efektívnu vodivosť celej vzorky (1

m³) skalnatej pôdy. Výrazne vyššiu hydraulickú vodivosť malo pórovité prostredie s vertikálne uloženými nepriepustnými elipsoidmi (vpravo); vodou nenasýtené oblasti sú malé.

Aká bola genéza vzniku tohoto smeru výskumu?

Zaujímavé (ale typické) je, že výskum vplyvu veľkých častíc horniny v lesných pôdach na ich hydrofyzikálne charakteristiky bol stimulovaný katastrofou; rozsiahlym polomom vo V. Tatrách v decembri 2004. Až dovtedy sa výskum koncentroval na poľnohospodárske, predovšetkým orné pôdy, kde bola optimalizácia režimu vody v pôde predpokladom dobrých úrod. Lesné pôdy neboli až tak zaujímavé. Dotiaľ, dokiaľ sa nestala katastrofa. Podobne to bolo inde vo svete. Samozrejme, existovali pokusy o určenie vplyvu kameňov na hydrofyzikálne vlastnosti pôdy, ale meranie bolo prakticky nemožné. Zdá sa, že sme boli prví (V. Novák, K. Kňava, ÚH SAV), koho napadlo numericky simulovať tento proces. Bolo to spôsobené aj dostupnosťou výkonnej výpočtovej techniky, existenciou modelu HYDRUS a skúseného spolupracovníka z Kalifornskej univerzity prof. J. Šimůnka, bez ktorého by náš nápad realizoval ťažšie a trvalo by to dlhšie. Výsledky výskumu boli publikované v popredných vedeckých časopisoch, boli (a stále sú) hojne citované.

Literatúra

- Hlaváčiková, H., Novák, V., Holko, L. (2015). On the role of rock fragments and initial soil water content in the subsurface runoff formation. *J. Hydrol. Hydromech.*, 63, 71 – 81.
- Hlaváčiková, H., Novák, V., Šimůnek, J. (2016). The effects of rock fragments shape and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils. *Geoderma*, 281, 39- 48.
- Hlaváčiková, H., Holko, L., Danko, M., Novák, V. (2019). Estimation of macropore characteristics in stony soils of a small mountain catchment. *Journal of Hydrology*, 574, 1176 – 1187.
- Novák, V., Kňava, K., Šimůnek, J. (2011). Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method. *Geoderma*, 161, 177 – 181.
- Novák, V., Kňava, K. (2012). The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: Simulation of water movement in forest stony soil. *Eur. J. Forest Research*, 131, 1727- 1735.
- Novák, V., Hlaváčiková, H. (2019). *Applied Soil Hydrology*. Springer Nature, Switzerland, AG, p. 342.
- Radcliffe, D.E., Šimůnek, J. (2010). *Soil physics with HYDRUS. Modeling and application*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA.