

VALIDÁCIA ARCHEOLOGICKÝCH PREDIKČNÝCH MODELOV VYTVORENÝCH POMOCOU FUZZY MNOŽÍN V PROSTREDÍ GIS

Lukáš KARELL, Tibor LIESKOVSKÝ, Renata ĎURAČIOVÁ

Validation of archeological predictive models made by means of fuzzy sets in GIS environment

Abstract: This paper deals with a validation of archeological predictive models (APM) made by means of fuzzy sets in GIS environment. This part of research on the valuation of fuzzy archeological predictive models is not widespread in geoinformatics and it is necessary to point out its relevance. The main part of the paper represents a description of recent known methods of the validation of predictive models and then it describes their modification for fuzzy APM. These methods were applied to the archeological predictive models from a specific region of Slovakia. APM were created by deductive fuzzy and deductive-inductive approach. The aim of this study is a comparison of approaches to creation and validation of fuzzy APM.

Keywords: archaeological predictive model, uncertainty modeling, fuzzy sets, validation

Úvod

Predikčné modelovanie je proces, ktorý umožňuje na základe známych alebo odvodených poznatkov predikovať výskyt určitého faktu alebo javu. V archeológii sa predikčné modelovanie využíva na stanovenie predpokladov alebo odhadov v súvislosti s určením potenciálu záujmovej oblasti byť archeologickým náleziskom. Výsledkom modelovania je archeologický predikčný model, na tvorbu ktorého je najvýhodnejšie použiť softvérové prostredie geografických informačných systémov (GIS), pretože archeologické predikčné modelovanie pracuje prevažne s priestorovými informáciami (databáza archeologických nálezísk, topografické mapy, digitálny model reliéfu, pôdne mapy a pod.). Základným problémom archeologických dát z pohľadu priestorového modelovania je ich neúplnosť, nejasnosť a nejednoznačnosť. Vhodným prostriedkom na ich modelovanie je teória fuzzy množín, ktorá poskytuje možnosť vyjadriť splnenie, resp. nesplnenie, podmienky tzv. stupňom príslušnosti k množine (číslo z intervalu $\langle 0,1 \rangle$), na rozdiel od booleovskej logiky, ktorá dovoľuje vyjadriť splnenie podmienky (napr. vhodnosti lokality pre archeologické nálezisko) len ostrými hodnotami „áno“ alebo „nie“ (1 alebo 0). Archeologický predikčný model (APM) vytvorený prostredníctvom fuzzy množín môžeme označiť ako fuzzy APM.

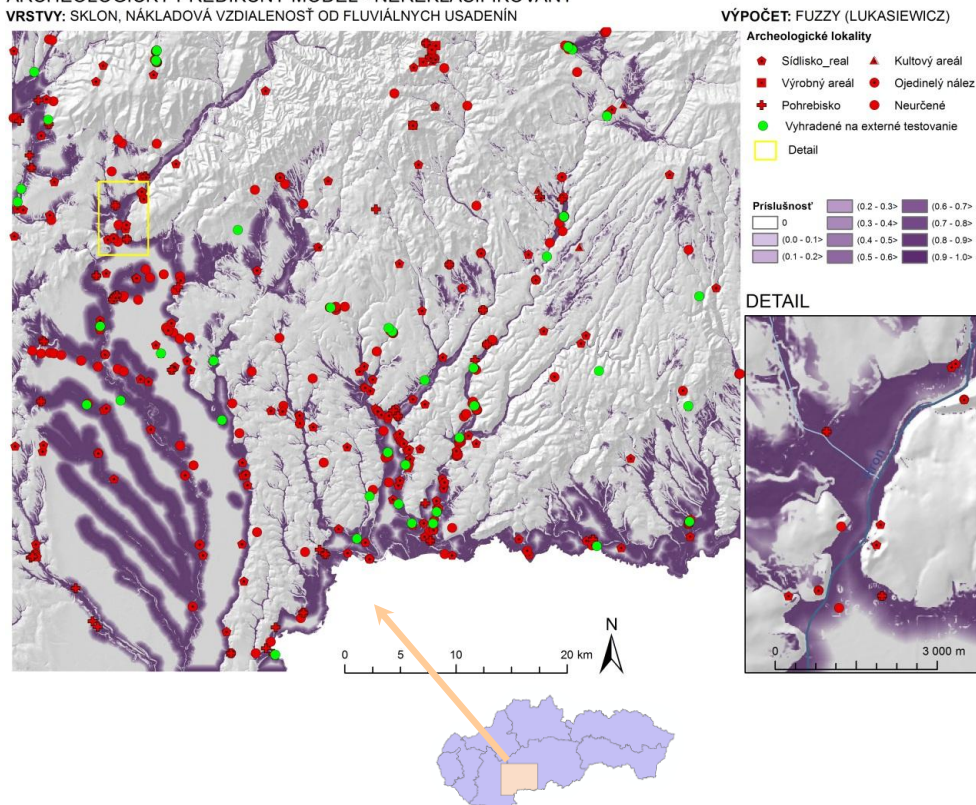
Dôležitou súčasťou tvorby predikčných modelov v GIS by mala byť ich následná validácia. Práve táto fáza je často opomínaná, aj keď bez otestovania a vyjadrenia kvality APM je jeho použitie neadekvátne. Jedným z dôvodov absencie validácie APM je skutočnosť, že v dostupných zdrojoch literatúry existuje veľmi málo poznatkov o vhodnej metóde validácie APM a prakticky neexistuje jednoznačný spôsob, ako testovať APM. Ešte náročnejšou je otázka validácie fuzzy APM. Cieľom príspevku je preto navrhnúť, priblížiť a otestovať vhodné metódy validácie APM vytvorených práve pomocou fuzzy množín.

1. Archeologické predikčné modely

Archeologický predikčný model (APM) v prostredí geografických informačných systémov je vyjadrený pomocou rastra, ktorého hodnota bunky vyjadruje mieru vhodnosti lokality ako potenciálneho archeologického náleziska (obr. 1).

Ing. Lukáš KARELL, Ing. Tibor LIESKOVSKÝ, PhD., Ing. Renata ĎURAČIOVÁ, PhD., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava,
e-mail: lukas_karell@centrum.sk, tibor.lieskovsky@stuba.sk, renata.duraciova@stuba.sk

ARCHEOLOGICKÝ PREDIKČNÝ MODEL - NEREKLASIFIKOVANÝ
VRSTVY: SKLON, NÁKLADOVÁ VZDIALENOSŤ OD FLUVIÁLNYCH USADENÍN



Obr. 1 Archeologický predikčný model (ukážka)

V archeologickom predikčnom modelovaní rozdeľujeme APM z hľadiska prístupu k ich tvorbe na *induktívne* a *deduktívne*.

Induktívne (empirické) modely (obr. 1) vychádzajú zo vzájomných vzťahov už známych archeologických lokalít k určitým atribútom krajiny. Predikcia nových lokalít potom spočíva v identifikácii takých vzťahov a lokalizácii takých miest v krajine, ktoré majú rovnaké alebo odpovedajúce vlastnosti ako v miestach pôvodných lokalít (Danielisová, 2008). Ich výhoda spočíva oproti deduktívnym modelom v jednoduchšom zhotovení.

Deduktívne modely sú menej často používané. Lokality pravdepodobnostného výskytu sa hľadajú na základe známych vlastností, ktoré by mali hľadané lokality spĺňať. Môžeme ich považovať za komplexnejšie, pričom sú ale náročnejšie na tvorbu z dôvodu modelovania určitých javov minulosti, z čoho vyplýva časová aj finančná náročnosť. Ich prínos je hlavne v akademickej rovine, pretože môžeme uplatniť faktory nielen z environmentálneho hľadiska, ale aj faktory kultúrne a sociálne.

Princíp tvorby predikčných modelov je založený na analytickom prekrývaní vrstiev priestorových údajov (operácie typu OVERLAY), ktoré patria medzi základné analytické operácie GIS. Pod analytickým prekrývaním rastrových dát rozumieme operácie, kde sa medzi príslušnými prvkami rastrovej štruktúry realizuje určitá matematická alebo štatistická operácia (Hlásny, 2007). Pri tvorbe APM v rámci analytického prekrývania vrstiev (napr. vrstva vhodnosti pôdy, vrstva vzdialenosti od vodných tokov a pod.) využívame aritmetické operácie, štatistické výpočty a operácie matematickej logiky. V analytickom prekrývaní sa štandardne využívajú princípy dvojhodnotovej (booleovskej) logiky, avšak na modelovanie neurčitosti môžeme aplikovať do tvorby APM aj trojhodnotovú alebo n-hodnotovú (fuzzy) logiku (Đuračiová et al., 2011).

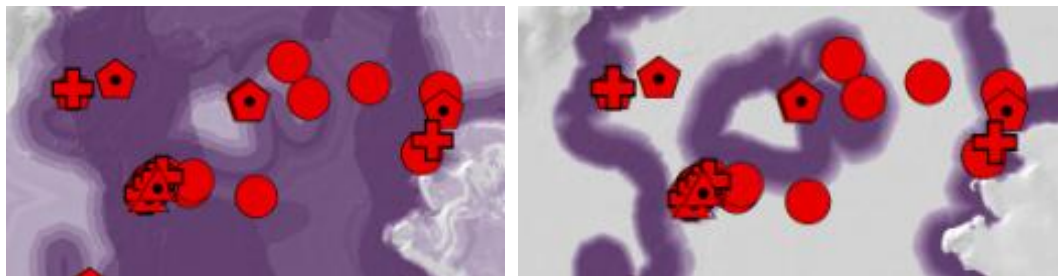
2. Validácia APM

Po fáze tvorby predikčných modelov by mala nasledovať ich samotná validácia, aj keď táto fáza je v archeologickom predikčnom modelovaní často opomínaná. Jedným z dôvodov je to, že neexistuje jednoznačný spôsob validácie APM. Dalším, a asi jedným z najpodstatnejších problémov, sú samotné dáta, či už na tvorbu modelu alebo jeho validáciu. Aj keď s rozvojom tvorby databáz archeologických nálezísk sa v súčasnosti sprístupňuje stále väčšie množstvo dát, na Slovensku je ich kvalita ešte veľmi nízka.

Cieľom našej práce je navrhnúť a otestovať vhodné kritéria validácie, ktoré by nielen charakterizovali samotnú kvalitu predikčného modelu, ale aby boli nápomocné aj pri zlepšovaní celého procesu tvorby predikčného modelu. Ako príklad môžeme uviesť voľbu vhodného prístupu (deduktívny – induktívny) k tvorbe modelu, alebo voľbu operácie analytického prekrývania vrstiev. Rozpracovaná teória metód validácie a ich následná aplikácia na konkrétnych APM sa snaží zodpovedať otázky týkajúce sa najmä posúdenia efektivity predkladaných metód a podmienok ich aplikovateľnosti (charakter vstupných dát, typ predikčného modelu a pod.).

2.1 Správnosť a presnosť APM

Validáciu modelu charakterizujeme ako proces ohodnotenia modelu, teda predstavuje prostriedok určenia jeho kvality. Aj keď základná koncepcia testovania (validácie) vychádza zo štatistiky, vo väčšine prípadov APM klasické štatistické testovanie nie je aplikovateľné. Predikčné modely sú obvykle výsledkom procesu klasifikácie a navyše pracujú s neúplnými dátami (kapitola 3), z čoho vyplýva nutnosť využitia špecifických metód testovania týchto modelov. Výsledkom validácie APM je určenie jeho efektivity (*angl. performance*) ako stupňa, s ktorým model *správne a presne* predikuje výskyt alebo neprítomnosť archeologických lokalít. Preto pred samotným vysvetlením jednotlivých metód validácie APM je dôležité objasniť význam pojmov *správnosť* (*angl. accuracy*) a *presnosť* (*angl. precision*) modelu, ktoré úzko súvisia s pojmami *hrubé chyby* a *chyby z plytvania* (chyby prvého druhu a chyby druhého druhu). *Správnosť modelu* v predikčnom modelovaní sa chápe vo význame správnej predikcie, t. j. či je väčšina lokalít zachytená modelom. *Presnosť modelu* v predikčnom modelovaní sa odvoláva na schopnosť modelu limitovať plochy výskytu tak tesne, ako je to možné. Keďže *správnosť* a *presnosť* spolu určujú efektivitu modelu, kvalitný model by mal byť *správny*, ale zároveň aj *presný*. Obidva pojmy sú výstižne znázornené na obr. 2.



Obr. 2 Rozdiel medzi *správnosťou* a *presnosťou*. Model naľavo zachytáva viac lokalít ako model napravo – je viac „*správny*“, ale model napravo limituje plochy výskytu – je viac „*presný*“.

Hrubé chyby potom predstavujú výskyt archeologických lokalít nájdených v zónach označených ako územia s nízkym potenciálom výskytu. Zváženie týchto chýb sa predpokladá pri aplikácii modelu na pragmatické účely, teda na ochranu kultúrneho a historického dedičstva.

Chyby z plytvania sú definované (Altshul, 1988) ako výskyt „nelokalít“ (*angl. non-sites*) nachádzajúcich sa v areáloch označených ako miesta s vysokým potenciálom výskytu lokalít. Chyby z plytvania sú menej závažným problémom z pohľadu archeológov, ale model obsahujúci veľké množstvo týchto chýb (model, ktorý je síce *správny*, ale nie *presný*) môže viesť k vyšším nákladom pre staviteľov, pokiaľ bude nutné uskutočniť archeologický výskum na väčšej ploche, ako je to v skutočnosti potrebné.

Riziko dopustenia sa hrubej chyby nepriamo súvisí s dopustením sa chyby z plytvania. Vysoká správnosť v predikčnom modeli minimalizuje hrubé chyby a vysoká presnosť minimalizuje chyby z plytvania.

2.2 Základné prístupy k validácii APM

Celá koncepcia validácie APM je postavená na dvoch prístupoch:

Interná validácia

Efektívnosť archeologického predikčného modelu sa určuje zo súboru dát, z ktorých bol model vygenerovaný. V tomto prípade sa nejedná o nové, nezávisle zbierané validačné dáta, ale testovanie predstavuje len istú formu vnútornej validácie modelu (validácia vnútornej presnosti), a preto výsledky neposkytujú adekvátnu odpoveď na otázku o skutočnej efektívnosti predikcie modelu.

Externá validácia

Pri externej validácii sa použijú obdobné metódy validácie ako v prvom prípade, ale APM sa hodnotí na základe nezávislej vzorky dát. Táto fáza okrem toho zahŕňa aj rôzne metódy výberu štatisticky významnej nezávislej vzorky dát. Forma externého testu má oveľa väčšiu výpovednú hodnotu ako interná validácia. Problémom pri jej aplikácii je ale nedostatok vstupných dát z databázy archeologických nálezísk na Slovensku.

2.3 Metódy validácie APM

Medzi metódy určenia kvality APM zaraďujeme výpočty jednotlivých charakteristík, parametrov validácie. Vo všeobecnosti platí, že parameter je vtedy vhodný na validáciu APM, ak dosahuje hodnoty, ktoré skutočne odzrkadľujú kvalitu APM a zároveň je jednoducho interpretovateľný (t. j. napr. nadobúda hodnoty z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, pričom hodnoty blízke 1 hovoria o efektívnom modeli, hodnoty blízke 0,5 predstavujú model, ktorého úroveň predikcie sa veľmi nelíši od náhodného rozdelenia („neutrálny model“) a nižšie hodnoty zodpovedajú úplne neefektívnemu modelu).

V prípade neúplných archeologických dát sú použiteľné nasledujúce parametre validácie APM: štatistika gain G (Altschul, 1988), relatívna štatistika gain G_R (Altschul, 1988), efektívnosť e (Ďuračiová et al., 2011) a Giniho koeficient G_k . Vzťahy na ich výpočet, a tiež rozsahy hodnôt, ktoré môžu parametre nadobúdať, sú uvedené v tab. 1.

Brierov parameter P_B (Brier, 1950) sme pre výpočet validácie v prípade neúplných dát modifikovali. Vzhľadom na to, že všetky dáta reprezentujú skutočné archeologické náleziská (absencia informácií o archeologickom výskume s negatívnym výsledkom (kapitola 3)), $E_{i,j}$ vo vzťahu na výpočet Brierovho parametra (tab. 1) nadobúda vždy hodnotu 1. Kvôli lepšej interpretácii výsledkov a ich možnému porovnaniu s ostatnými parametrami je vhodné, ak správne modely nadobúdajú z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ hodnoty bližšie k 1 a nesprávne modely hodnoty blízke 0. Výsledkom týchto zmien vo vzťahu na výpočet Brierovho parametra je modifikovaný vzťah (modifikovaný Brierov parameter (tab. 1)), ktorý bude taktiež hovoriť o správnosti modelu.

Uvedené metódy validácie APM (okrem Giniho koeficienta a Brierovho parametra) sú určené primárne pre binárne APM (rozdelenie územia na dve kategórie – vhodné a nevhodné), prípadne sú limitované počtom kategórií vhodnosti územia (max. 3 – efektívnosť e). Aby boli použiteľné na validáciu fuzzy APM, je nevyhnutné jednotlivé vzťahy zovšeobecniť alebo fuzzy model za účelom jeho validácie pretransformovať pomocou defuzzyfikácie na binárny model, prípadne model s tromi kategóriami vhodnosti („územie s vysokou vhodnosťou“, „stredne vhodné územie“ a „územie s nízkou vhodnosťou“). Defuzzyfikácia však môže viesť k zníženiu potenciálu fuzzy modelov v dôsledku istej straty informácie o vhodnosti, resp. nevhodnosti územia.

2.4 Modifikácia parametrov validácie pre fuzzy APM

Pri APM založených na fuzzy logike spočíva modifikácia výpočtu parametrov validácie v zavedení výslednej funkcie príslušnosti vyplývajúcej z príslušného prieniku vrstiev vhodnosti podmienok použitých na tvorbu konkrétneho APM.

Princíp modifikácie parametrov validácie ukážeme na príklade zovšeobecnenia parametra e pre fuzzy APM. Pôvodný parameter e (tab. 1) budeme v rámci validácie fuzzy APM označovať ako e_1 . Pri validácii rozlišujeme 2 varianty podľa toho, to či testujeme APM reklasifikovaný (vzniká ako výsledok defuzzyfikácie ľubovoľným počtom kategórií) alebo nereklasifikovaný:

Tab. 1 Parametre validácie APM

Parameter validácie	Rozsah hodnôt	Kvalita modelu*	Neutralita modelu**	Matematický vzťah
Štatistika gain G	$(-\infty, 1)$	$\rightarrow 1$	$\rightarrow 0$	$G = 1 - \frac{p_a}{p_s}$
Relatívna štatistika gain G_R	$\langle -1, 1 \rangle$	$\rightarrow 1$	$\rightarrow 0$	$G_R = p_s - p_a$
Efektivita e	$(-\infty, \infty)$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow 0$	$e = \frac{p_s}{p_a} - \frac{p_{ns}}{p_{na}}$
Giniho koeficient G_k	$\langle 0, 1 \rangle$	$\rightarrow 1$	$\rightarrow 0$	$G_k = 1 - \sum_{i=1}^t (x_i - x_{i-1})(y_i + y_{i-1})$
Brierov parameter P_B	$\langle 0, 1 \rangle$	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 1$	$P_B = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^n (\mu_{b_i,j} - E_{i,j})^2$
Modifikovaný Brierov parameter P_{B_n}	$\langle 0, 1 \rangle$	$\rightarrow 1$	$\rightarrow 0$	$P_{B_n} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu_{b_i} - 1)^2$

p_a je relatívna početnosť „vhodného územia“, ktorá je klasifikovaná APM,

p_s je relatívna početnosť archeologických lokalít, ktoré sú príslušným APM identifikované na „vhodnom území“,

p_{ns} je relatívna početnosť archeologických lokalít, ktoré sú príslušným APM identifikované na „území s nízkou vhodnosťou“,

p_{na} je relatívna početnosť záujmovej oblasti, ktorá je APM klasifikovaná v kategórii „územie s nízkou vhodnosťou“,

t je počet kategórií vhodnosti,

j je stupeň kategórie vhodnosti,

n je počet lokalít,

$\mu_{b_i,j}$ je funkcia príslušnosti prislúchajúca konkrétnej bunke rastra (polohe lokality) i patriacej k triede j ,

$E_{i,j}$ je klasifikácia lokality vyskytujúcej sa v triede j alebo nie (nadobúda hodnoty 0 alebo 1),

x_i a y_i sú kumulatívne súčty relatívnych početností skúmaných javov.

* **Kvalita modelu** – $p_s \rightarrow 1 \wedge p_a \rightarrow 0 \wedge p_{ns} \rightarrow 0 \wedge p_{na} \rightarrow 1$

** **Neutralita modelu** – rozmiestnenie predikovaných oblastí sa neodlišuje od náhodného rozloženia.

Reklasifikovaný fuzzy APM

Ak uvažujeme rôzny počet kategórií vhodnosti, výsledný vzťah („modifikovanú efektivitu APM“) definujeme ako:

$$e_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{k_i} p_{sk_i}}{p_a} - \frac{p_{ns}}{p_{na}}, \quad (1)$$

kde:

n je počet kategórií,

μ_{k_i} je funkcia príslušnosti prislúchajúca konkrétnej kategórii vhodnosti,

p_{sk_i} je relatívna početnosť archeologických lokalít nachádzajúcich sa v prislúchajúcej kategórii.

Vzťah na výpočet efektivity e (tab. 1) môžeme modifikovať aj pridaním funkcie príslušnosti pre relatívne početnosti zastúpenia záujmovej oblasti v jednotlivých kategóriách vhodnosti:

$$e_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{k_i} p_{sk_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_{k_i} p_{ak_i}} - \frac{p_{ns}}{p_{na}}, \quad (2)$$

Nereklasifikovaný fuzzy APM

Z doposiaľ spomenutých variantov bude modifikácia efektivity v tomto prípade najstriktnejšia, keďže celý model je spojitý a funkcia príslušnosti je definovaná pre každú bunku rastra (polohu lokality). Definujeme ju ako:

$$e_4 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{b_i} p_{sb_i}}{p_a} - \frac{p_{ns}}{p_{na}}, \quad (3)$$

kde:

μ_{b_i} je funkcia príslušnosti prislúchajúca konkrétnej bunke rastra (polohe lokality).

Podobným spôsobom ako efektivita e boli modifikované (zovšeobecnené) za účelom validácie fuzzy APM aj ďalšie parametre validácie (G_1, G_2, G_3, G_4).

3. Praktická realizácia validácie APM

Na validáciu bolo použitých 32 APM (tab. 2), z toho 16 APM bolo už vyhotovených v rámci práce (Lieskovský, 2011). APM boli vytvorené pre záujmové územie juhu stredného Slovenska v oblasti dolného Poiplia a Pohronia. APM boli vyhotovené rôznymi prístupmi a vznikali kombináciou rozličných vrstiev, ktoré boli štatistickým testovaním (Lieskovský et al., 2011) vyhodnotené ako najvhodnejšie (relevantné) na tvorbu APM (nákladová vzdialenosť od vodných tokov, nákladová vzdialenosť ku hraniciam fluviálnych usadenín, sklon reliéfu, vrstva pôdných typov a pod.). Databáza predstavovala 750 archeologických lokalít, tento počet bol zredukovaný na 396 lokalít, keďže vhodné na modelovanie sú len lokality označené stupňom lokalizácie 1 – presná, čo predstavovali lokality identifikované na mape, resp. získané zo súradníc (Lieskovský, 2011). Ako výrazný limitujúci faktor dát ovplyvňujúci voľbu validačných metód predstavujú absentujúce informácie o tzv. „negatívnych záznamoch“, t. j. záznamoch, že v danej lokalite sa uskutočnil archeologický výskum, avšak nenašli sa archeologické pozostatky. Dôvody absencie takýchto dát, potrebných najmä pri využívaní bežných metód validácie predikčných modelov, je možné pripísať aj časovej a finančnej náročnosti dodatočného zberu informácií tohto typu.

Samotný proces validácie bol rozčlenený na dve časti podľa prístupu k tvorbe APM. Prvá časť zahŕňala modely deduktívne fuzzy (APM deduktívne fuzzy (DF)), pričom sa pri ich tvorbe aplikovali fuzzy množiny a rôzne operácie analytického prekrývania vrstiev (fuzzy prieniky – Łukasiewiczova t-norma, minimová t-norma, súčinnová t-norma (Kolesárová a Kováčová, 2004) a vážený aritmetický priemer (lineárna kombinácia vrstiev)). Tieto modely vznikali kombináciou jednotlivých vrstiev („fuzzy vrstiev vhodnosti“), v ktorých hodnota v každom bode predstavuje stupeň príslušnosti k fuzzy množine: „vhodnosť sklonu reliéfu“, „vhodnosť nákladovej vzdialenosti k hraniciam fluviálnych usadenín“, „vhodnosť nákladovej vzdialenosti k veľkým a stredným vodným tokom“ a „vhodnosť pôd“. Pre druhú časť validácie boli použité APM deduktívno-induktívne (DI). V skratke ide o modely, ktoré vznikli štatistickým vyhodnotením zastúpenia archeologických lokalít a krajiny v jednotlivých vrstvách (histogramy početnosti), na základe ktorých sa potom určili funkcie príslušnosti k jednotlivým fuzzy množinám a z nich „fuzzy vrstvy vhodnosti“. Prienik vytvorených vrstiev sa potom určoval, podobne ako v predchádzajúcom prípade, prostredníctvom t-noriem alebo lineárnou kombináciou vrstiev. Týmto spôsobom bolo vytvorených 16 nových APM.

Prípravu dát na validáciu APM sme zrealizovali v softvérovom prostredí ArcGIS 10 a výpočet jednotlivých parametrov validácie bol následne vykonaný v programovom prostredí Microsoft Excel 2010. Externá validácia bola vykonaná na dvoch nezávislých vzorkách dát (vždy náhodný výber 15 % pôvodných dát z databázy archeologických nálezísk).

Tab. 2 APM použité na validáciu

		Vrstvy				
		FSP	VSP	FS	VS	
Metódy tvorby APM	DF	L	APM_FSP_DF_L	APM_VSP_DF_L	APM_FS_DF_L	APM_VS_DF_L
		M	APM_FSP_DF_M	APM_VSP_DF_M	APM_FS_DF_M	APM_VS_DF_M
		S	APM_FSP_DF_S	APM_VSP_DF_S	APM_FS_DF_S	APM_VS_DF_S
		W	APM_FSP_DF_W	APM_VSP_DF_W	APM_FS_DF_W	APM_VS_DF_W
	DI	L	APM_FSP_DI_L	APM_VSP_DI_L	APM_FS_DI_L	APM_VS_DI_L
		M	APM_FSP_DI_M	APM_VSP_DI_M	APM_FS_DI_M	APM_VS_DI_M
		S	APM_FSP_DI_S	APM_VSP_DI_S	APM_FS_DI_S	APM_VS_DI_S
		W	APM_FSP_DI_W	APM_VSP_DI_W	APM_FS_DI_W	APM_VS_DI_W

Vstupné vrstvy:

FSP – fluviaľné usadeniny, sklon, pôdy

VS – vodné toky, sklon

VSP – vodné toky, sklon, pôdy

FS – fluviaľné usadeniny, sklon

Operátor analytického prekrývania vrstiev:

L – Łukasiewiczzova t-norma

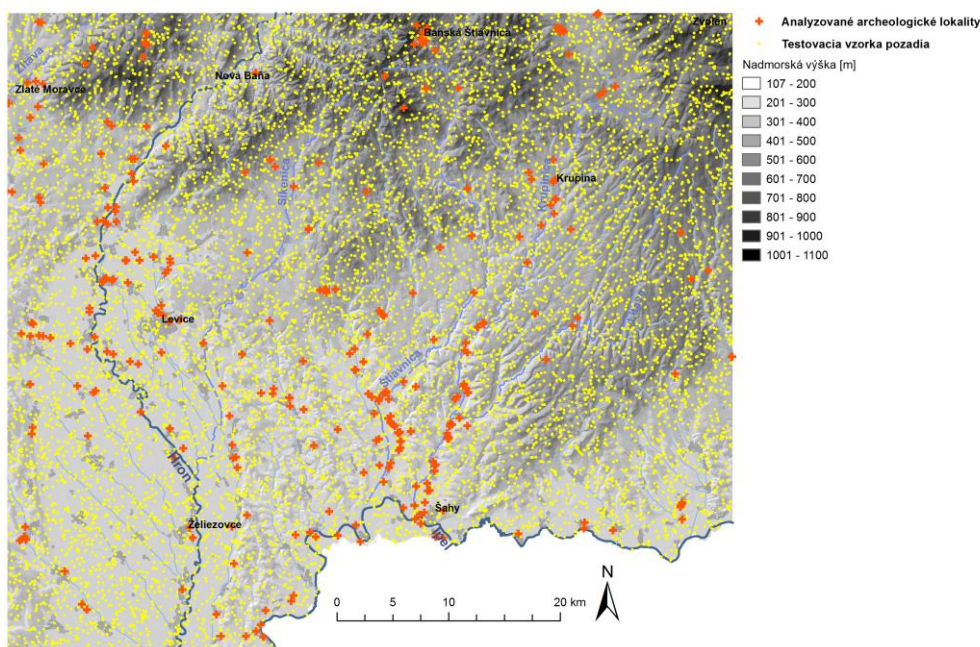
M – minimová t-norma

S – súčinnová t-norma

W – vážený aritmetický priemer

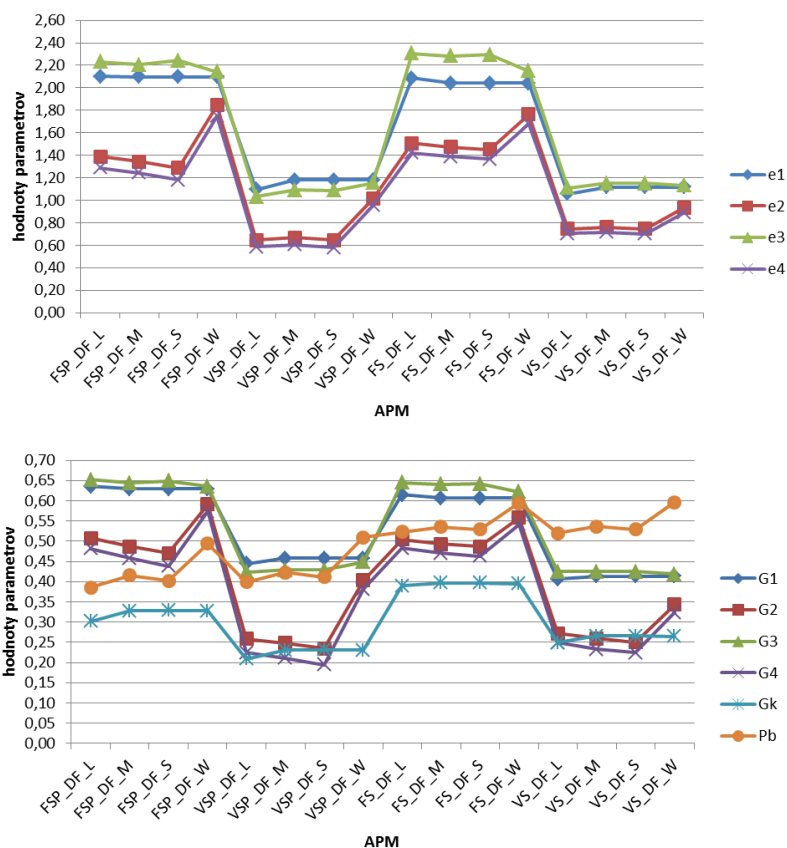
3.1 Validácia deduktívnych fuzzy APM

V tomto prípade sa nerozlišuje externá a interná validácia, keďže pri tvorbe tohto typu APM sa nezvažuje vplyv výskytu známych archeologických lokalít v krajine. Do procesu validácie bolo zahrnutých všetkých 396 lokalít (obr. 3). Priebeh výsledkov validácie pre parametre $e_1 - e_4$, $G_1 - G_2$, G_k a P_b znázorňuje obr. 4.



Obr. 3 Rozloženie archeologických lokalít a testovacej vzorky pozadia

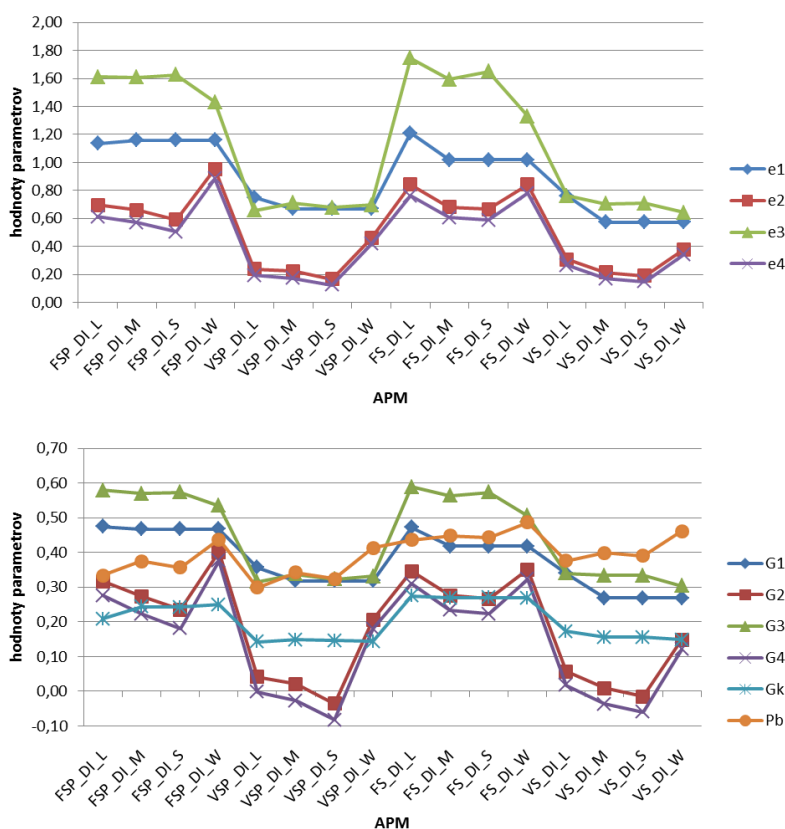
Testovacia vzorka pozadia v spracovaní nahrádza celkovú plochu územia, t. j. neuvažujeme všetky bunky rastra, ale používame vzorku 10 000 náhodne rozmiestnených bodov v krajine. V štatistickom testovaní v prípade premenných (pôdny typ), kde dokážeme určiť ich absolútnu početnosť, bol rozdiel medzi absolútnou početnosťou a početnosťou testovacej vzorky pozadia menší ako 1 %, preto množstvo náhodne vygenerovaných bodov pokladáme za dostatočné (Lieskovský, 2011).



Obr. 4 Grafický priebeh parametrov $e_1 - e_4$, $G_1 - G_4$, G_k a P_b pre deduktívne fuzzy APM

3.2 Validácia deduktívno-induktívnych APM

Pri tvorbe APM deduktívno-induktívnym prístupom sa štatisticky zhodnocuje výskyt archeologických lokalít v krajine a na základe získaných výsledkov sa generuje APM. V tomto prípade má preto význam zvažovať internú a externú validáciu. Lokality nezahrnuté do procesu tvorby APM potom neovplyvnia jeho výsledok, a tým má externá validácia väčšiu výpovednú hodnotu. Externá validácia (a zároveň aj interná) sa vykonala 2-krát, ale vždy pre inú vzorku 15 % (59) archeologických lokalít. Grafické znázornenie výsledkov externej validácie pre 1. vzorku archeologických lokalít pre parametre $e_1 - e_4$, $G_1 - G_4$, G_k a P_b je na obr. 5.



Obr. 5 Grafický priebeh parametrov $e_1 - e_4$, $G_1 - G_4$, G_k a P_b pre deduktívno-induktívne APM (externá validácia pre 1. vzorku archeologických lokalít)

4. Hodnotenie a odporúčania

Metódy validácie boli aplikované na hodnotenie APM deduktívnych fuzzy a deduktívno-induktívnych. Keďže sme mali pre spomínané APM k dispozícii len dáta s pozitívnym výsledkom z archeologických výskumov, aplikovali sme metódy zvažujúce tento faktor. Z výsledkov validácie pre všetky typy APM je zrejماً vzájomná korelácia medzi jednotlivými parametrami a ich modifikáciami. Z analýzy výsledkov pre praktické účely navrhujeme použiť parameter e_2 (prípadne G_2) zvažujúci rovnomerne presnosť a správnosť modelu. Ďalej parameter e_3 (prípadne G_3) prisudzujúci relevantnosť k presnosti modelu, čo je dôležité z hľadiska nákladov pre staviteľov pri prieskume územia a parameter P_b hodnotiaci modely z hľadiska správnosti (minimalizácia hrubých chýb), teda zvažujeme ochranu kultúrneho a historického dedičstva. Vylúčenie parametrov e_1 (prípadne G_1) a G_k pre modely vytvorené fuzzy množinami je nutné z dôvodu neuváženia stupňa príslušnosti (neprejavuje sa v nich napr. rozdiel medzi modelmi vytvorenými s využitím jednotlivých t-noriem a pomocou váženého priemeru). Avšak parameter e_1 (prípadne G_1) svoje opodstatnenie napr. pre APM deduktívno-binárne stále má. Navrhujeme nevyužívať parameter e_4 (prípadne G_4), keďže dáva totožný priebeh výsledkov ako parameter e_2 (prípadne G_2), len výsledky sú o niečo nižšie. Problémom aplikovaných parametrov, s výnimkou parametrov G_k a P_b , je škála nadobudnutých hodnôt, keďže výsledky môžu nadobudnúť hodnoty $\pm\infty$ (pri G len $-\infty$). Toto je možné vyriešiť len ďalšou modifikáciou týchto parametrov. Praktickým prínosom by mohlo byť aj vytvorenie aplikácie, ktorá by urýchlila celý proces výpočtov validácie, a tiež prezentovania výsledkov.

Z modelov deduktívnych fuzzy a deduktívno-induktívnych najlepšie výsledky dosahovali APM tvorené Łukasiewiczovou t-normou a váženým aritmetickým priemerom. Značné diferencie sa ukázali medzi modelmi vytvorenými pomocou vrstiev fluviaálnych usadenín, sklonu (a prípadne aj vhodnosti pôd) a modelmi vytvorenými z vrstiev vodných tokov, sklonu (a pôd). Tu sa ukázalo, že APM tvorené z vrstvy vodných tokov dosahujú významne nižšie hodnoty parametrov validácie a vrstva pôd prispieva k zvýšeniu hodnôt validácie len veľmi málo alebo vôbec (prínos tejto vrstvy predpokladáme pri dostupnosti kvalitnejších vstupných dát). Pri validácii modelov deduktívno-induktívnych sa ako pozitívum javí obdobné správanie výsledkov externej validácie pre 1. a 2. vzorku archeologických lokalít. Výsledky takto tvorených APM sú podľa očakávaní nižšie v porovnaní s APM deduktívnymi fuzzy. Tu navrhujeme zaoberať sa v budúcnosti procesom optimalizácie APM. Možnosti ich spresnenia spočívajú najmä vo vhodnom stanovení priebehu funkcií príslušnosti, vylúčení špecifických archeologických lokalít (ktorých umiestnenie neodpovedá bežným zákonitostiam osídľovania, ale vzťahujú sa na územie atraktívne z iného dôvodu, napr. z hľadiska ťažby nerastných surovín, kultového faktora a pod.), rozdelení lokalít na sídliská a hradišká alebo v aplikovaní kvalitnejšej vrstvy pôdnych typov. Modifikácia APM by mala prispieť k zlepšeniu výsledkov validácie deduktívno-induktívnych APM.

Záver

Príspevok poukazuje na nedostatočne rozvinutú problematiku validácie APM, pretože doposiaľ neexistuje jednoznačný matematický aparát validácie vhodný pre akýkoľvek typ modelu. Ako najvýznamnejší limitujúci faktor, či už pri tvorbe alebo validácii APM, sa ukazuje byť práve množstvo vstupných archeologických dát a ich kvalita. Odlišné metódy validácie volíme najmä podľa dostupnosti, resp. nedostupnosti dát z negatívnych archeologických záznamov. V príspevku je uvedených niekoľko spôsobov validácie určených na riešenie tohto problému samotných dát. Keďže ide o validáciu fuzzy APM, existujúce metódy validácie sme vzhľadom na túto skutočnosť zároveň modifikovali tak, aby bol zachovaný celkový potenciál modelovania neurčitosti pomocou fuzzy množín. Navrhli a otestovali sme aj nové metódy validácie APM, avšak túto problematiku pokladáme za stále otvorenú, pretože poskytuje dostatok priestoru na ďalší výskum, najmä v modifikáciách a v navrhovaní nových metód a parametrov hodnotenia.

Práca prináša prvotnú štúdiu metód validácie APM so zameraním na fuzzy modely. Obsiahnutá teória a praktická realizácia validácie má potenciál napomôcť k dosiahnutiu lepších výsledkov celkovej problematiky archeologického predikčného modelovania. Stane sa tak jej pevnou a dôležitou súčasťou, keďže využívanie predikčných modelov bez vykonania validácie a nepoznania informácie o ich kvalite je prinajmenšom nespoľahlivé a v niektorých prípadoch až rizikové.

Podakovanie: Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0249-07.

Literatúra

- ALTSCHUL, J. H. (1988). *Quantifying the present and predicting the past: Theory, Method, and Application of Archeological Predictive Modeling* [online]. Colorado (U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management Service Center Denver). [cit. 2012-06-29]. Dostupné na: <http://www.blm.gov/heritage/adventures/research/StatePages/PDFs/Colorado/quantifying_colorado.pdf>
- BRIER, G. W. (1950). *Verification of forecasts expressed in terms of probability* [online]. Washington, D.C. (U.S. Weather Bureau), [cit. 2012-06-29]. Dostupné na internete: <<http://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/078/mwr-078-01-0001.pdf>>
- DANIELISOVÁ, A. (2008). *Oppidium České Lhotice v kontextu svého sídelního zázemí. (The oppidum of České Lhotice and its hinterland)* [online]. Dizertačná práca. Praha (Ústav pro pravěk a ranou dobu dějinnou, FF UK). [cit. 2012-06-29]. Dostupné na: <http://uprav.ff.cuni.cz/pages/studium/TÉZE_Danielisova.pdf>
- ĎURAČIOVÁ, R., LIESKOVSKÝ, T., KROČKOVÁ, K., SABO, M. (2011). Multikriteriálne rozhodovanie pomocou fuzzy množín v prostredí GIS a jeho využitie v archeologickej predikcii. *Geodetický a kartografický obzor*, 57/99, 9, s. 205-215.
- GOLÁŇ, J. (2003). *Archeologické prediktivní modelování pomocí geografických informačních systémů: Na příkladu území jihovýchodní Moravy*. Dizertačná práca. Brno (Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta).

- HLÁSNY, T. (2007). *Geografické informačné systémy – Priestorové analýzy*. Zvolen (Agentúra ZEPHYROS & Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav).
- KOLESÁROVÁ, A., KOVÁČOVÁ, M. (2004). *Fuzzy množiny a ich aplikácie*. Bratislava (Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta).
- LIESKOVSKÝ, T. (2011). *Využitie geografických informačných systémov v predikčnom modelovaní v archeológii*. Dizertačná práca. Bratislava (Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta).
- LIESKOVSKÝ, T., FAIXOVÁ CHALACHANOVÁ, J., ĎURAČIOVÁ, R., BLAŽOVÁ, E. (2011). *Archeologické predikčné modelovanie z pohľadu geoinformatiky*. Bratislava (REMPrint, s.r.o.).

S u m m a r y

Validation of archeological predictive models made by means of fuzzy sets in GIS environment

This paper is focused on the insufficiently developed issue of fuzzy archaeological predictive models (APM) (Fig. 1) – validation. The most important limiting factor both in the creation or validation of APM seems to be the amount of data and their quality. The paper presents several ways of validation of APM created from incomplete archaeological data (unavailability of data from negative archaeological records). Known methods of validation APM (performance characteristics of APM: gain statistic G , relative gain statistic G_R , Brier score P_B , effectiveness e and Gini coefficient G_k (Tab. 1) were modified (for example $e_1, e_2, e_3, e_4, G_1, G_2, G_3, G_4, P_B, G_k$) to keep potential of uncertainty modelling by fuzzy sets. The paper also presents some new methods of validation APM focused on fuzzy models.

The validation was applied on 32 APM (Tab. 2), 16 new models were created in this study and 16 of APM were already made in the work (Lieskovský, 2011). APM were created for a territory in the south central Slovakia. The archaeological database from this territory contains 750 archaeological sites; this number was reduced to 396 sites (sites suitable for predictive modelling). APM were prepared by different approaches and by combination of different layers (slope, distance from watercourses, soil suitability, distance from fluvial deposits, etc.)

The process of validation was divided into two approaches: validation of fuzzy deductive model and validation of deductive-inductive models. The first part included fuzzy deductive models (DF) created by fuzzy sets and different analytical operations for overlapping layers (fuzzy intersections - Łukasiewicz t-norm (L), minimum t-norm (M), product t-norm (S) and a weighted linear combination of layers (W)). These models were created by combining layers – "fuzzy layers of appropriateness", where the value of each point represents a degree of membership of a fuzzy sets - "suitability of slope" (S), "suitability of cost-distance to the border of fluvial deposits" (F), "suitability of cost-distance to watercourses" (V) and "soil suitability" (P). The second part of the validation is performed on deductive-inductive models (DI) created by statistical evaluation of archaeological data with use of fuzzy sets for modelling suitability of parameters.

The data for validation of APM were prepared in the software ArcGIS 10 and the calculation of validation parameters was then performed in the programming environment Microsoft Excel 2010. The external validation was performed on two independent samples of data (always random selection of 15% of the original data from a database of archaeological sites).

The paper also highlights the difference between accuracy and precision of the model (Fig. 2). For determination of accuracy and precision of the model we propose to use parameter e_2 or G_2 . The parameters e_3 and G_3 are suitable only to quantify precision and parameter P_B is appropriate to quantify accuracy. The best results are achieved by models APM_FS_DF_L and APM_FS_DF_W.

This paper presents initial study of methods for fuzzy APM validation, but this issue is still open and offers good opportunity for further research. Presented theory and its practical implementation have a potential to achieve better results in archaeological prediction. The validation could be an important part of archaeological predictive modelling, because the use of predictive models without known information about their quality is unreliable.

Fig. 1 Archaeological prediction model

Fig. 2 The difference between accuracy and precision

Fig. 3 The archaeological sites and the test sample background

Fig. 4 Performance characteristics of APM: $e_1 - e_4, G_1 - G_4, G_k$ a P_b for deductive fuzzy APM

Fig. 5 Performance characteristics of APM: $e_1 - e_4, G_1 - G_4, G_k$ a P_b for deductive-inductive APM

Tab. 1 Performance characteristics of APM

Tab. 2 Validated APM