

HODNOCENÍ PŘESNOSTI DIGITÁLNÍCH MODELŮ RELIÉFU

JANA SVOBODOVÁ*

Jana Svobodová: Evaluation of digital elevation model accuracy. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 8, 2008, 1, 7 tabs., 5 refs.

The article deals with an evaluation of the digital elevation model accuracy as theoretically as practically. The general processes of evaluation of the accuracy and the practical results obtained by the computing of digital elevation models and their evaluation on the test areas are presented in this text. The results of the evaluation of accuracy are then related to the used interpolation methods, their parameters and the types of a relief of the test areas.

Key words: DEM; IDW; spline; accuracy of the DEM; relief

1 ÚVOD

Maximálně přesný digitální model reliéfu je základní podmínkou pro výpočet dalších morfometrických charakteristik (např. sklonu a orientace svahu či křivosti reliéfu), které jsou běžně využívány nejen při geomorfologických analýzách a studiích. Pokud neodhalíme a neodstraníme chyby v digitálním modelu reliéfu, jejich existence se určitě projeví právě při výpočtu morfometrických charakteristik mnoha extrémními či nereálnými hodnotami.

Pro zjišťování přesnosti existuje několik metod, z nichž ty nejdůležitější budou představeny níže. Hodnocením množství digitálních modelů reliéfu vzniklých použitím různých interpolačních metod a nastavení jejich parametrů lze také určit a potvrdit závislost přesnosti právě na vybrané interpolační metodě a jejím nastavení.

2 TESTOVANÁ ÚZEMÍ A PODKLADOVÁ DATA

Hodnocení přesnosti digitálních modelů reliéfu v závislosti na zvolené interpolační metodě a nastavení jejich parametrů bylo dosud provedeno na 16 testovacích územích s různými typy reliéfu: rovina, plochá pahorkatina, členitá pahorkatina, plochá vrchovina, členitá vrchovina, plochá hornatina, členitá hornatina a jako specifický typ i brázda na úrovni okrsků geomorfologického členění reliéfu (**tab. 1**). Pro navazující výzkum je zvoleno dalších 11 území.

Vstupními daty jsou vrstvy vrstevnic DMÚ 25 zakoupené Katedrou geoinformatiky v Olomouci (PřF, Univerzita Palackého) a z Výzkumného záměru MŠMT s názvem "Dynamická geovizualizace v krizovém managementu"

řešeného na Geografickém ústavu PřF Masarykovy univerzity v Brně. Příprava i další zpracování dat v prostředí GIS bylo prováděno v softwarech od firmy ESRI ArcGIS v. 9.2 a ArcView GIS v. 3.2.

3 POUŽITÉ INTERPOLAČNÍ METODY

K modelování různých typů reliéfu pomocí různých nastavení parametrů bylo využito interpolačních metod IDW, regulovaný spline a spline s tenzí (v prostředí ArcGIS 9.2). V dalším výzkumu bude testování rozšířeno na další metody (např. kriging, převod TIN → grid. Pro připomenutí principů použitých metod a funkce parametrů je dále uveden jejich stručný popis.

IDW – INVERSE DISTANCE WEIGHTING

Základní myšlenkou metody inverzních vzdáleností je *První geografické pravidlo*: "Věci, které mají k sobě blíže spolu více souvisí než ty vzdálenější" (TOBLER 1970). Tato metoda se tedy používá k určení nadmořské výšky z buňky pomocí váženého průměru z nadmořských výšek bodů ležících do určité vzdálenosti (dle vyhledávacího poloměru) od počítané buňky. Metoda IDW je lokální interpolační metoda (VOŽENÍLEK et al. 2001).

Hlavními vstupními parametry jsou *Power* a počet vstupních bodů představovaný počtem nejbližších bodů, které budou zahrnuty do výpočtů. Volba *Power* umožňuje uživateli ovládat vliv (význam) známých bodů na interpolované hodnoty na základě jejich vzdálenosti od výstupního bodu. Jedná se o kladné reálné číslo. Vyšší hodnota této volby dává větší důraz na nejbližší body a povrch tak bude členitější (více detailnější) a tím pádem méně shladený.

*Katedra geoinformatiky, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého, tř. Svobody 26, 771 46, Olomouc, Česká republika, e-mail: svobodova-j@centrum.cz

Typ reliéfu	Testovací		Další	
	Český masiv	Karpaty	Český masiv	Karpaty
Sníženina – brázda	Blanická brázda	Pozlovická brázda	Borkovická pánev	
Rovina	Sadská rovina	Žerotínská rovina		Červenecká rovina
Plochá pahorkatina	Nechanická tabule	Orlovská plošina	Ostroměřská tabule	
Členitá pahorkatina	Podještědská pahorkatina	Vlčnovská pahorkatina	Radomyšlská pahorkatina, Milínská pahorkatina	Prakšická pahorkatina
Plochá vrchovina	Studenská vrchovina	Divácká vrchovina		Uhřícká vrchovina
Členitá vrchovina	Bozkovská vrchovina	Hošťálkovská vrchovina	Kozlovská vrchovina, Rožmberská vrchovina	
Plochá hornatina	Ústecké středohoří	Rusavská hornatina		
Členitá hornatina	Homoopavská hornatina, Čemohorská rozsocha		Boubínský hřbet, Včelenská hornatina	

Tab. 1 Přehled testovacích a dalších území sloužících pro určení optimálního nastavení parametrů interpolačních metod

Nižší hodnota této volby dává větší vliv i dalším, vzdálenějším bodům v okolí a výsledkem je shladenější povrch. Avšak, pokud je *Power* rovna nule, výsledný bod je pouze průměrem všech vstupních (zahrnutých) bodů (ArcGIS 9.2 *Desktop Help*).

Charakter interpolovaného povrchu může být také omezen *vstupními body* pro výpočet každého interpolovaného bodu. Vstup může být omezen určením počtu nejbližších vstupních bodů nebo použitím poloměru kružnice, která zahrne vstupní body. Dále bylo využito pouze první možnosti.

SPLINE

Metoda „plajnu“ využívá matematicky definované křivky, které interpolují jednotlivé části povrchu po částech. Základní výraz *spline* interpolace minimální křivosti vychází z následujících dvou požadavků na interpolant: povrch musí přesně procházet datovými body a povrch musí mít minimální křivost (kumulativní součet čtverců druhých derivací povrchu provedený v každém bodě povrchu musí být minimální) (ArcGIS 9.2 *Desktop Help*).

Výsledný povrch často bývá velmi hladký díky vyhlazení bariér a skoků, proto je vhodnější jej používat spíše při interpolaci velmi hladkých povrchů (jevů) (VOŽENÍLEK et al. 2001). Jedná se opět o lokální metodu interpolace.

V prostředí ArcGIS v. 9.2 existují dvě základní metody: regulovaná a s tenzí. Metoda *regulovaný spline* vytváří shladený, postupně

se měnící povrch s hodnotami, které mohou ležet mimo rozsah vstupních dat. U tohoto typu, parametr váhy definuje váhu třetích derivací povrchu ve výrazu minimalizace křivosti. Vyšší váha znamená shladenější výsledný povrch. Hodnoty tohoto parametru musí být větší nebo rovny nule. Typické používané hodnoty jsou: 0, 0.001, 0.01, 0.1 a 0.5 (ArcGIS 9.2 *Desktop Help*).

Metoda *spline s tenzí* ovlivňuje tuhost povrchu v závislosti na charakteru modelovaného jevu. Vytváří méně shladený povrch s hodnotami více vázanými v rozsahu vstupních dat. U této metody parametr váhy definuje váhu tenze, která mění minimalizační kritéria tak, že jsou do nich zahrnuti první derivace. Vyšší váha způsobuje hrubší vstupní povrch. Žádávané hodnoty musí být větší nebo rovny nule. Typické jsou 0, 1, 5 a 10 (ArcGIS 9.2 *Desktop Help*).

VÝPOČET DIGITÁLNÍCH MODELŮ RELIÉFU

Do hodnocení přesnosti vstupovalo pro každý typ reliéfu (tj. 2 testovací území) 212 digitálních modelů reliéfu, které se od sebe lišily použitím různých interpolačních metod a nastavením jejich parametrů.

Kritériem, pro výběr hodnot parametru počet vstupních bodů před začátkem testování, bylo otestovat různé případy od minimálního počtu vstupních bodů, tj. od 3, až po takový počet bodů, který by obsáhl široké okolí interpolovaného bodu, např. 50 bodů - i když v tomto případě byla již předpokládána chybná

interpolace, právě v důsledku případného zahrnutí i velmi vzdálených bodů. Obdobně i u druhého parametru (váha – *Spline*, *Power* – *IDW*) byly testovány jak doporučené hodnoty (podle ArcGIS 9.2 *Desktop Help*), tak i krajní hodnoty (u váhy *spline* je dán interval možných nabývajících hodnot 0–1) nebo netypické hodnoty (u *IDW* – typická hodnota *Power* je 2; ArcGIS 9.2 *Desktop Help*), aby mohla být zjištěna případná vhodnost určitého nastavení pro daný typ reliéfu. Do vlastních výpočtů nevstupovaly vrstevnice, ale body, které vznikly jejich převedením. Z takto vzniklých bodů bylo před vlastními výpočty digitálních modelů reliéfu 10 % bodů vyjmuta a ponecháno jako referenční (např. pro výpočet *RMSE*). Výsledkem hodnocení přesnosti jednotlivých modelů je určení nevhodnější interpolační metody a hodnoty nebo častěji intervalu hodnot jednotlivých parametrů, při jejichž použití lze získat nejpřesnějším digitální modely reliéfu vhodné pro další použití.

Z vrstev vstupních bodů bylo tedy vygenerováno celkově 1 696 digitálních modelů reliéfu pro 16 výše zmíněných testovacích území. Používané hodnoty parametrů pro jednotlivé metody jsou uvedeny v **tabulce 2**, velikost pixelu byla zvolena na 5 m. Parametry byly vzájemně kombinovány, např. pro metodu *Spline* s tenzí s počtem vstupních bodů 3 je postupně použito váhy 0, 1, 5, 10, 15, 20, 30 a 50, pro počet vstupních bodů 5 opět váhy 0,1, 5, 10, 15, 20, 30 a 50,... Během výpočtů digitálních modelů reliéfu i při získávání výsledků z jejich hodnocení bylo využito možností *batch processing*.

4 METODY HODNOCENÍ PŘESNOSTI DIGITÁLNÍCH MODELŮ RELIÉFU

Kvalita DMR závisí především na zdroji dat a způsobu interpolace. V DMR se mohou vyskytovat systematické a nesystematické chyby a následně mohou ovlivňovat výpočet dalších morfometrických atributů. Lze nalézt tři typy chyb: (i) hrubé chyby z lidského zavinění, (ii) systematické chyby a (iii) náhodné chyby či šumy, které nelze odstranit.

Pro určení a redukci nepřesností DMR existuje několik metod. Rychlým způsobem pro odkrytí většiny chyb je vizuální kontrola digitálního modelu reliéfu. Takto lze identifikovat jasně viditelné stopy v případě nedostačujícího vertikálního rozlišení a problémy vyvstávající u terénních hran nebo lokálních anomálií (GALLANT a WILSON 2000). Používány jsou však i další objektivnější metody srovnávající DMR s předpokládanými chybami s referenčními daty použitím statistických metod. Mezi základní patří porovnání směrodatné odchylky, průměru, minimální a maximální hodnoty, k dalším pak např. výpočet *RMSE*.

ZÁKLADNÍ STATISTICKÉ CHARAKTERISTIKY

Pro každý digitální model reliéfu v jednotlivých testovacích územích (typech reliéfu) byla zjištěna hodnota minimální a maximální nadmořské výšky, průměrné nadmořské výšky a směrodatné odchylky. Tyto hodnoty byly dá-

Metoda	IDW	Regulovaný Spline	Spline s tenzí
Počet vstupních bodů	3, 5, 10, 15, 20, 30, 50	3, 5, 10, 15, 20, 30	3, 5, 10, 15, 20, 30
Mocnitel	0.5, 1, 2, 3		
Váha		0, 0.01, 0.1, 0.5, 0.9	0, 1, 5, 10, 15, 20, 30, 50

Tab. 2 Použité nastavení parametrů interpolačních metod pro výpočty digitálních modelů reliéfu

Divácká vrchovina (plochá vrchovina)			Průměrná nadmořská výška [m]	Směrodatná odchylka [m]	Maximální nadmořská výška [m]	Minimální nadmořská výška [m]
	Vstupní body		284,060	29,340	220,000	385,000
Odchylka od vstupních bodů [m]						
<i>IDW</i>	max.	0,812	2,802	7,855	16,972	
	min.	0,537	0,456	0,000	10,001	
Regulovaný <i>spline</i>	max.	1,034	3,499	10,562	9,113	
	min.	0,967	3,302	3,165	8,848	
<i>Spline</i> s tenzí	max.	0,964	3,319	2,343	9,528	
	min.	0,795	2,724	0,148	9,060	

Tab. 3 Odchylky základních statistických charakteristik od hodnot vstupních bodů pro testované metody na příkladu ploché vrchoviny (Divácké vrchoviny)

Žerotínská rovina (rovina)			Průměrná nadmořská výška [m]	Směrodatná odchylka [m]	Maximální nadmořská výška [m]	Minimální nadmořská výška [m]
	Vstupní body		251,713	3,840	245,000	260,000
Odchylka od vstupních bodů [m]						
IDW	max.	0,825	1,768	1,919	3,477	
	min.	0,604	0,128	0,000	0,000	
Regulovaný <i>spline</i>	max.	0,877	0,400	0,149	0,585	
	min.	0,802	0,275	0,000	0,000	
<i>Spline</i> s tenzí	max.	0,880	0,411	2,966	3,086	
	min.	0,630	0,196	0,000	0,000	

Tab. 4 Odchyly základních statistických charakteristik od hodnot vstupních bodů pro testované metody na příkladu roviny (Žerotínské roviny)

le porovnávají s odpovídajícími hodnotami vstupního výškového bodového pole.

Při porovnání výsledků ze všech testovacích území, můžeme potvrdit následující trend:

- při porovnání hodnot základních statistických charakteristik za jednotlivé interpolační metody vzhledem ke vstupním bodům lze sledovat obdobný trend u všech metod. K maximálním odchylkám od hodnot vstupních bodů dochází u minimální a maximální nadmořské výšky (až 16 m v ploché vrchovině, viz **tab. 3**), menších odchylek je dosahováno u průměrné nadmořské výšky a směrodatné odchylky. Vhodným nastavením parametrů interpolačních metod lze odchylky sledovaných statistických charakteristik minimalizovat (např. v **tab. 3** lze vysledovat u metody IDW rozdíl mezi maximální a minimální odchylkou maximální nadmořské výšky až 7,855 m).

- odchylky od vstupních bodů (chyby) i rozdíly mezi jednotlivými metodami se směrem od členitějších typů reliéfu (hornatin, vrchovin) k méně členitým typům reliéfu (pahorkatinám, rovinám) zmenšují (**tab. 3** a **tab. 4**), což je podmíněno zmenšujícím se rozptylem hodnot nadmořských výšek.

RMSE

Pokročilejší a také nejčastější metodou pro určení přesnosti digitálního modelu reliéfu je *Root Mean Square Error* – *RMSE*. Měří rozptyl rozdělení četností odchylek mezi původními výškovými daty a daty DMR. Matematicky je vyjádřena jako (WOOD 1996):

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{di} - Z_{ri})^2}$$

kde: Z_{di} je i -tá hodnota nadmořské výšky z povrchu DMR

Z_{ri} je korespondující původní nadmoř-

ská výška (zde odpovídá hodnotám referenčních bodů vyjmutých z množiny vstupních bodů)

n je počet kontrolovaných bodů.

Větší hodnota *RMSE* odpovídá většímu rozptylu mezi dvěma datovými sadami. Ideální hodnota by neměla přesáhnout polovinu hodnoty intervalu původních vrstevnic. V případě vrstevnic z datového modelu DMÚ25, které mají interval vrstevnic 5 m, by neměla překračovat hodnotu 2,5 m.

Sledováním hodnot *RMSE* můžeme také zjistit určitý trend v průběhu hodnot:

- maximálních hodnot *RMSE* dosahují jednoznačně digitální modely reliéfu vytvořené metodou IDW při použití většího počtu vstupních bodů. Výrazným snížením počtu bodů zahrnutých do výpočtů se sníží i chyba. U metody IDW je však vždy (tj. u všech typů reliéfu) vykazován největší rozptyl hodnot *RMSE*. Můžeme se tedy i domnívat, že na hodnoty *RMSE* mají vstupní parametry největší vliv právě u metody IDW.

- oba typy metody *Spline* vykazují u všech typů reliéfu (např. **tab. 5** a **tab. 6**) mnohem nižší hodnoty *RMSE* (i rozptyl hodnot v rámci jedné interpolační metody). Digitální modely reliéfu vytvořené metodou regulovaného *splinu* vykazují nejvyrovnanější hodnoty *RMSE*, tzn. je zde nejmenší vliv vstupních parametrů, avšak i maximální a minimální hodnoty *RMSE* digitálních modelů reliéfu vytvořených metodou *splinu* s tenzí se liší jen o desetiny.

- i u této charakteristiky platí, že rozdíly hodnot *RMSE* mezi testovanými metodami i v rámci jednotlivých metod, se směrem od členitějších typů reliéfu (hornatin, vrchovin) k méně členitým typům reliéfu (pahorkatinám, rovinám) zmenšují (**tab. 5** a **tab. 6**), což je podmíněno zmenšujícím se rozptylem hodnot nadmořských výšek.

K další kvantifikaci chyb v digitálních modelech reliéfu jsou používány i povrchy nepřesnosti jako např. *hammock plot* (zejména pokud

Divácká vrchovina (plochá vrchovina)	RMSE		Interpolační metoda	Nastavení parametrů		
	max.	min.		Počet vstupních bodů	Mocnitel	Váha
		6,078	2,096	IDW	50	0,5
				10	3	
	0,820	0,722	Regulovaný Spline	10		0,9
				30		0
	1,142	0,719	Spline s tenzí	3		50
				30		10

Tab. 5 Maximální a minimální hodnoty RMSE dosažené použitím jednotlivých interpolačních metod na příkladu ploché vrchoviny (Divácké vrchoviny)

Žerotínská rovina (rovina)	RMSE		Interpolační metoda	Nastavení parametrů		
	max.	min.		Počet vstupních bodů	Mocnitel	Váha
		1,824	0,000	IDW	50	0,5
				3	2	
	0,153	0,110	Regulovaný Spline	5		0
				10		0,01
	0,257	0,097	Spline s tenzí	3		50
				10		10

Tab. 6 Maximální a minimální hodnoty RMSE dosažené použitím jednotlivých interpolačních metod na příkladu roviny (Žerotínské roviny)

vstupní data vychází z vrstevnic). *Hammock plot* je povrch (rastr), který vznikne celočíselným dělením hodnot digitálního modelu reliéfu, dělitelem je číslo odpovídající intervalu původních vrstevnic (WOOD 1996). Takto lze tedy detekovat chyby vzniklé díky procesu interpolace z vrstevnic (v tomto případě bodů vygenerovaných z vrstevnic), kterými jsou nadměrné výskyty hodnot pixelů odpovídající hodnotám původních vrstevnic – tj. pixelů se zbytkem nula.

ZÁVĚR

Po srovnání všech digitálních modelů reliéfu v rámci každého území podle výše zmiňovaných metod hodnocení, byla pro každé území vybrána nejvhodnější metoda a nastavení jejích parametrů (tab. 7), které by mělo vést k dosažení nejkvalitnějších digitálních modelů daného typu reliéfu. Z tabulky 7 vyplývá, že pro všechny typy reliéfu je velmi vhodná metoda *Spline* s tenzí, která vytváří podle nastavené hodnoty váhy různě shlazené povrchy.

Tato metoda je již ze své podstaty vhodná pro interpolaci reliéfu z výškových dat (ArcGIS 9.2 *Desktop Help*). Tento předpoklad byl při testování použití této a dalších metod pro výpočet různých typů reliéfu potvrzen. Hodnoty parametru počet vstupních bodů je pro všechny typy reliéfu nejčastěji mezi 20–30

bodů, vyšší hodnoty tohoto parametru již vedly k chybné interpolaci díky zahrnutí i velmi vzdálených bodů. Pro méně členité typy reliéfu je vhodnější počet vstupních bodů nižší, neboť již u hodnot okolo 30 může opět docházet k zahrnutí i velmi vzdálených bodů v důsledku jejich malé hustoty. U parametru váhy je rozptyl hodnot od 1 do 10 pro všechny typy reliéfu. Z toho vyplývá, že tyto hodnoty závisí spíše na typu modelovaného jevu (v tomto případě reliéfu) než na jeho variabilitě (typech reliéfu). Pro modelování reliéfu je tedy vhodné používat spíše nižší hodnoty parametru váhy interpolační metody *spline* s tenzí (tab. 7). Výše zmíněné výsledky byly získány testováním v programu ArcGIS 9.2, nicméně je lze použít i v dalších programech, které nabízí testované interpolační metody. Pro srovnání bude část dalšího výzkumu (ověřování výsledků) probíhat i v komerčním softwaru GRASS GIS.

Hlavním výstupem tohoto testování je tedy návrh nastavení parametrů, který by měl usnadnit rozhodování při tvorbě digitálního modelu reliéfu jako podkladu pro výpočet morfometrických atributů, pro modelování prostorových procesů či obecně podkladu pro přesnější vědecké závěry geomorfologických studií. Prvotní testování bylo provedeno na 16 testovacích územích, pro objektivnější výsledky je však

Typ reliéfu	Karpaty			Český Masiv		
	Interpolační metoda	Počet vstupních bodů	Váha	Interpolační metoda	Počet vstupních bodů	Váha
Rovina	<i>Spline s tenzí</i>	10	10	<i>Spline s tenzí</i>	5	510
Plochá pahorkatina	<i>Spline s tenzí</i>	20	1	<i>Spline s tenzí</i>	10	15
Členitá pahorkatina	<i>Spline s tenzí</i>	20	1	<i>Spline s tenzí</i>	20	1
Plochá vrchovina	<i>Spline s tenzí</i>	30	10	<i>Spline s tenzí</i>	30	10
Členitá vrchovina	<i>Spline s tenzí</i>	20	15	<i>Spline s tenzí</i>	30	15
Plochá hornatina	<i>Spline s tenzí</i>	30	15	<i>Spline s tenzí</i>	30	5
Členitá hornatina				<i>Spline s tenzí</i>	15	15
Brázda	<i>Spline s tenzí</i>	20	1	<i>Spline s tenzí</i>	20-30	15

Tab. 7 Nejvhodnější metoda a nastavení jejich parametrů pro dosažení nejkvalitnějších DMR pro jednotlivé typy reliéfu

třeba v tomto procesu pokračovat dále, rozšířit toto testování na další území a vzájemně výsledky porovnávat a sledovat, zda zde existuje nějaký trend.

LITERATURA

ArcGIS 9.2 Desktop Help [online]. [cit. 2008-11-06]. Dostupný z WWW: <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=An-overview-of-Spatial-Analyst>>.

GALLANT, J. P., WILSON, J. C. (2000). *Terrain analysis – Principles and applications*. New York.

TOBLER, W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 2, 46 s.

VOŽENÍLEK, V. et al. (2001). VOŽENÍLEK, V., KIRCHNER, K., KONEČNÝ, M., KUBÍČEK, P., LÉTAL, A., PETROVÁ, A., ROTHOVÁ, A., SEDLÁK, P. (2001). *Integrace GPS/GIS v geomorfologickém výzkumu*. Univerzita Palackého Olomouc, v Olomouci, 185 s.

WOOD, J.D. (1996). *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. Geography Department, University of Leicester, UK, unpublished Ph.D. dissertation., Dostupný také z WWW: <<http://www.geog.le.ac.uk/wo/research/dem-char/thesis/>>.