

## 10. DIGITÁLNY MODEL RELIÉFU

Jeden z účelov podrobného merania je pripravovať grafické projekčné podklady vo forme mapy. Avšak projekčné podklady v tejto forme nemôžeme priamo použiť pri automatizácii projekčnej činnosti. Zapojenie počítačov do automatizácie niektorých prác spojených s projektovaním, si vynútilo hľadať výrazové prostriedky na vyjadrenie terénu. Novým prostriedkom sa stal digitálny model reliéfu (DMR). Pod pojmom digitálny model reliéfu sa nejedná o vyjadrenie terénu alebo jeho modelu súradnicami bodov. Súradnice sú len sprostredkujúcimi veličinami pre digitálny model reliéfu.

DMR vzniká analyticky konštrukciou topografickej plochy z množiny bodov v rámci interpolačného okolia.

DMR umožní automatizovať výpočty kubatúr, rozvor hmôt, výpočet plôch prikrytých zemným telesom atď., pri projektovaní líniových a plošných stavieb. Použitím komerčných softvérov pomocou odmeraných súradníc a výšok bodov terénu odvodených z DMR riešime výškopis, vykresľujeme polohopis a výškopis mapy, profily, ako aj projekt stavby. DMR môžeme použiť na vypracovanie viac alternatív projektu pre rôzne vstupné projekčné hodnoty (polomery oblúkov, prechodnice, sklonové pomery, prechody vyžadovanými miestami a pod.). Podľa dopredu určených kritérií (napr. minimalizácia zemných prác a dopravných objektov, najkratšia spojnice a pod.) sa vyberá optimálna alternatíva projektu a jeho realizácia.

Počítačové prostriedky umožňujú vykresliť projekt na terénnom reliéfe v rôznych projekciách a priestorovo ho vizualizovať. Účelové využitie DMR sa rozširuje o digitálny model krajiny, ktorý obsahuje tri základné vrstvy dát.

1. Nadpovrchové dáta obsahujú údaje o prírodnom geosystéme a jeho antropogénnej nadstavbe: vlhkostné pomery, vegetácia, aktuálne využitie plôch terénneho reliéfu,
2. povrchové dáta o terénnom reliéfe, ktoré dovoľujú morfometrické operácie, rotácie a zmeny pohľadu DMR,
3. podpovrchové dáta, ktoré súvisia s geologickou štruktúrou pod terénnym reliéfom.

Toto je problematika softvérového inžinierstva, ktorú rozvíjajú príslušné stavebné odbory a nebudeme sa ňou v tomto učebnom texte zaoberať. Z geodetického hľadiska si vyznačíme tvorbu DMR s ohľadom na možnosti jeho využitia.

### 10.1 DEFÍNÍCIA DIGITÁLNEHO MODELU RELIÉFU

Digitálny model reliéfu je vo všeobecnosti definovaný ako súbor vybraných bodov na terénnej ploche, ktorých súradnice ( $y$ ,  $x$ ,  $H$ ) sú v určitom systéme uložené v pamäťovom médiu počítača. Súbor je doplnený programom, ktorý umožňuje z uloženej bodovej množiny získať ďalšie informácie. Napr. program na konštrukciu vrstevníc, program na interpoláciu výšok z ľubovoľných medziľahlých bodov s adresou ( $y$ ,  $x$ ), usporiadaných do ľubovoľných skupín.

Použitie DMR je obmedzené podmienkou, že plocha modelu reliéfu musí byť funkciou súradníc  $y$ ,  $x$ , teda každému bodu polohopisu je priradená práve jedna súradnica  $H$ . Nie je možné spracovávať previsy v teréne. Je možné pracovať s niekoľkými modelmi súčasne, napr. pri výpočte objemov, zobrazovaní rezov, v perspektívnych pohľadoch a v niektorých geologických aplikáciach.

Požiadavky na formu a obsah DMR môžeme formulovať takto:

- DMR musí byť jednoznačne matematicky definovaný a schopný spracovania na počítači,
- DMR musí reprezentovať terénnu plochu v úplnosti a s vyžadovanou presnosťou.

Terénnu plochu nemôžeme priamo matematicky definovať, musíme ju generalizovať vynechaním nepodstatných podrobností a zanedbaním jej drsnosti. Plošný jav, ktorý vznikol po generalizácii,

nazývame topografická plocha. Topografickú plochu už môžeme matematicky vyjadriť ako spojitú funkciu s dvoma premennými v tvare:

$$H \equiv z = f(y, x) . \quad (10.1)$$

Na topografickej ploche sú jednotlivé terénne body zaznamenávané v tvare:

$$[y, x, z, i] , \quad (10.2)$$

kde  $y, x, z$  sú súradnice vo zvolenom polohovom a výškovom systéme a  $i$  je identifikačný znak vyjadrujúci druh terénneho bodu, prípadne jeho označenie na akej spojnici (hrane) leží.

Topografická plocha sa nedá vyjadriť v celom rozsahu univerzálnou funkciou jednotného tvaru, lebo jednotlivé terénne body vplývajú na priebeh terénnej plochy plynule alebo skokom. Na správne opísanie topografickej plochy je potrebné na terénnej ploche rozlišovať regulárne a singulárne terénne body.

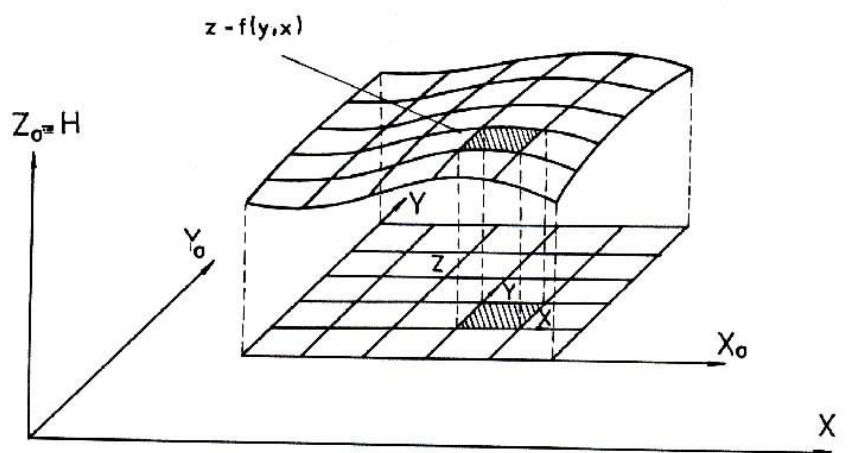
Za regulárne terénne body označujeme tie, v ktorých môžeme definovať dotykovú rovinu k danej ploche, čiže sú to body prislúchajúce jednej interpolačnej rovine (obr. 10.1a). Singulárne sú tie terénne body, kde nastáva náhly prechod jedného útvaru do druhého, ako napr. na terénnych hranách (obr. 10.1b). Na vystihnutie terénnej plochy majú singulárne body osobitný význam, v súbore bodov sa osobitne klasifikujú typom povinnej spojnice (hrany).

Pri aproximovaní terénnej plochy používame ešte pojmy drsnosť terénu a lokálne extrém. Drsnosť terénu predstavuje malé nerovnosti povrchu terénu, ktoré vyplývajú zo štruktúry terénu alebo antropogénnej činnosti na ňom (napr. terén postihnutý eróziou, poľnohospodársky obrábaná pôda

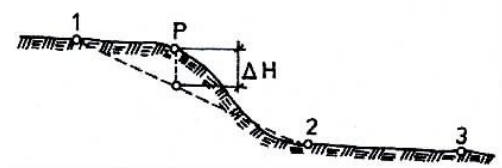


Obr. 10.1. Regulárne a singulárne body

a pod.). Topografická plocha sa volí ako vyrovnávací plocha v priemernej výške pásma drsnosti. Lokálne extrém terénnej plochy sú miestne minimá od aproximovanej topografickej plochy, ktoré danými výrazovými prostriedkami nie je možné vyjadriť a sú zanedbávané



Obr. 10.2. Rozloženie bodov DMR v pravidelnom štvorcovom rastrí



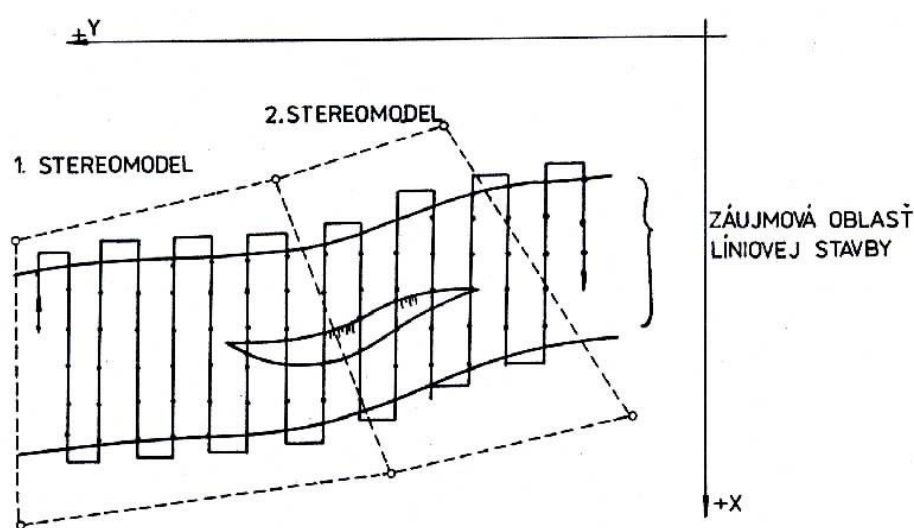
Obr. 10.3. Chyba vo výške pri interpolácii bodu pri riedkom rastrí

Systémy DMR z hľadiska ich formy rozdeľujeme na tri skupiny podľa:

- tvaru a usporiadania bodovej množiny,
- použitej interpolačnej metódy na určovanie výšok ľubovoľných bodov s adresou  $(y, x)$ ,
- zužitkovanie informácií interpoláciou, napr. na výpočet kubatúr, kresbu profilov a pod.

Formu DMR najviac charakterizuje usporiadanie množiny bodov na topografickej ploche, ktoré môžu byť:

- pravidelné v rohoch štvoruholníkovej, pravouhlníkovej alebo trojuholníkovej siete (obr. 10.2). Tvorba DMR v tejto forme je jednoduchá a umožňuje aj použitie nenáročných interpolačných procedúr. Veľkosť obrazca sa volí tak, aby zvolený krok bol menší ako odstupy medzi lokálnymi maximami a minimami, pretože ináč môže dôjsť k chybám v opise topografickej plochy (obr. 10.3).
- morfologicky rozložené, pri ktorom sa výber bodov uskutočňuje podľa topografických zásad. Body DMR sa volia na čiarach kostry terénu v miestach, kde tieto menia svoj smer alebo sklon, okrem toho sa body vyberajú v miestach lokálnych extrémov;
- rozložené na vrstevniciach alebo na profiloch (obr. 10.4);
- rozložené polyedricky, kde sa body DMR volia v rohoch nepravidelných trojuholníkov, ktoré sa dobre prímkykajú k topografickej ploche.



Obr. 10.4. Rozloženie bodov DMR podľa profilov

Na celkovú činnosť ktoréhokoľvek systému DMR v softvérovej obsluhu je dôležitý vzťah medzi formou rozloženia bodov a príslušnou interpolačnou metódou. Interpolácia sa môže uskutočniť z primárnych vstupných údajov, alebo sa uskutočňuje v dvoch stupňoch: najprv sa z primárnych informácií vytvorí aproximačná plocha, podľa ktorej sa potom realizujú príslušné matematické operácie. Činnosti konštrukcie DMR popisujú príslušné SW manuály, napr. (Atlas DMT, Terra Modeler a iné).

## 10.2 ZÍSKAVANIE PRIMÁRNYCH INFORMÁCIÍ

Primárne informácie pre tvorbu DMR môžeme získať:

- geodetickým meraním v teréne,
- fotogrametricky, vyhodnotením leteckých (prípadne aj pozemných fotogrametrických) snímok,
- vektorizáciou obsahu existujúcich máp

Geodetické meranie na tvorbu DMR sa uskutočňuje spravidla elektronickou tachymetriou.

Fotogrametrické metódy sa považujú dnes za hlavné metódy na tvorbu DMR. Používame pritom dve technológie tvorby DMR:

- numerické vyhodnotenie na analógových vyhodnocovacích prístrojoch s registráciou súradníc,
- analytické vyhodnotenie založené na matematickej projekcii.

Vektorizácia je založená na určovaní terénnych bodov z výškopisnej zložky mapy. Pritom máme možnosť voliť body na vrstevniciach alebo na profiloch v pravidelných odstupoch, prípadne body volíme s prihliadnutím na morfológiu terénu. Súradnice terénnych bodov digitalizujeme na rastrovej kópii mapy.

Výber bodov DMR, ich hustota a rozloženie sa riadi podľa charakteru terénu. Počet bodov nemôžeme presne vymedziť, i keď sú vypracované optimálne počty bodov pre ten-ktorý charakteristický terénny typ, napr. jednoduchý terén a pravidelne členitý terén 20 až 40 bodov/ha, nepravidelný, veľmi členitý terén 100 až 400 bodov/ha atď. Získané informácie o teréne sa potom vhodnou transformačnou metódou upravujú na štandardné vyjadrenie podľa vzťahu (10.1).

### 10.3 MODEL PLOCHY RELIÉFU

Základnými vstupnými údajmi pre model reliéfu ktorý vyjadríme vrstevnicami, sú súradnice odmeraných alebo digitalizovaných bodov. Z týchto bodov sa vytvára nepravidelná trojuholníková sieť. Spojnice bodov, ktoré nazývame hranami sú zvolené tak, aby sieť pokiaľ je možné neobsahovala úzke a dlhé trojuholníky. Na spojniciach bodov sa interpolujú vrstevnice. Spojitá plocha modelu reliéfu je riešená vo variante lineárnom a hladkom.

Pri **lineárnom variante** plocha reliéfu je vytvorená rovinnými trojuholníkovými plochami v trojuholníkovej sieti.

Pri **hladkom variante** plocha reliéfu prechádza všetkými bodmi trojuholníkovej siete. Plocha je pri tom spojitá a hladká s výnimkou lomových hrán. Nad každým trojuholníkom je definovaná funkcia určujúca krivú plochu, ktorá hladko nadväzuje na plochy susedných trojuholníkov. Pri vhodnom rozložení bodov na terénnom reliéfe dáva toto riešenie hladkého variantu veľmi dobré priblíženie skutočného tvaru modelovanej topografickej plochy, ktorú vizualizujeme vrstevnicami.

Tvar plochy je možné ovplyvniť zavedením **povinných spojníc** bodov (povinných hrán) do trojuholníkovej siete. Každá povinná spojnice spája dva určité body siete. Pri vytváraní modelu reliéfu je možné použiť niekoľko typov spojníc. Sú to spojnice povinné, lomové alebo priame a spojnice na vytvorenie ostrovov. Typ spojnice (povinná lomová, priama) ovplyvňuje tvar reliéfu len pri použití hladkého variantu modelu reliéfu.

**Ostrovným** typom spojnice je možné vytvoriť v modeli reliéfu **ostrovy** – pôdorysne ohraničené oblasti, v ktorých nie je definovaný model reliéfu. Ostrovy sa používajú napr. na vynechanie kresby vrstevníc v miestach, kde sú v teréne umiestnené budovy.

#### Význam typov povinných spojníc (hrán)

**Povinné** hrany nie sú lomové. Nad nimi dochádza k vyhladeniu modelu reliéfu vo všetkých smeroch. Povinné hrany sa používajú pri zadaní chrbátic a údolníc, na vyznačenie polohopisnej kresby (napr. hranice pozemkov, ploty a pod.) alebo na úpravu tvaru trojuholníkovej siete modelu reliéfu.

Nad **lomovými** hranami nedochádza k vyhladeniu topografickej plochy v priečnom smere, model sa nad nimi láme. Lomové hrany sú výškovo zakrivené tak, aby pozdĺžny rez nad skupinou nadväzujúcich lomových hrán bol pokiaľ je to možné hladký. Lomové hrany sa používajú na vyznačenie terénnych lomov singulárnymi bodmi (hrana svahu, brehu, rokliny, cesty, priekopy a iné).

**Priame** hrany sú skutočne priame v priestore. Využívajú sa na vytváranie umelých útvarov na modeli reliéfu, ako sú napr. budovy.

**Ostrovná** spojnice predstavuje povinnú hranu, ktorá predstavuje okrajovú hranu ostrova, t. j. oblasti, v ktorej sa nevyhodnocujú vrstevnice. Podobne ako lomové hrany, ostrovné spojnice sú výškovo zakrivené.

**Priame ostrovné** spojnice majú rovnaký význam ako ostrovné spojnice, sú však v priestore priame.

Typ povinných spojnic klasifikujeme v priebehu merania.

Pre každú spojnicu dvoch bodov môže byť definovaná **priorita** hrany, ktorú definujeme číslom od 0 do 255. V priebehu generovania trojuholníkovej siete číslo priority zaistí, že v prípade kríženia povinných hrán zostanú zachované tie, ktoré majú väčšiu prioritu. Taktiež body a trojuholníky môžu mať číselnú informáciu (od 0 do 255) na rozlíšenie ich významu.

Pojmom **obalové trojuholníky** sú označené úzke a dlhé trojuholníky na okraji siete, ktoré sú nevhodné na spracovanie v aplikačných programoch. Takto označené trojuholníky zostanú súčasťou siete ale nezapoja sa do aplikácie. Obalové trojuholníky sa označujú pri editácii siete.

Vytvorenie a úpravy modelu reliéfu s jeho priestorovou vizualizáciou nájdeme v príručkách užívateľa príslušného softvéru.

#### 10.4 VYUŽITIE DIGITÁLNEHO MODELU RELIÉFU

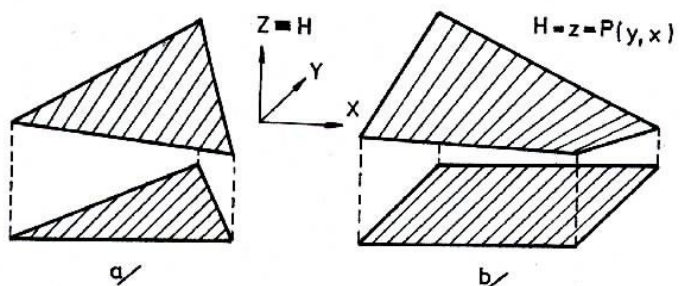
Okrem konštrukcie vrstevníc, najviac používanou matematickou operáciou na DMR je interpolácia výšok  $z_i$  bodov  $P_i$  s adresou  $(y_i, x_i)$ . Postup interpolácie spočíva v tom, že z danej bodovej množiny podľa určitého kritéria (napr. maximálna vzdialenosť) pre okolie hľadaného bodu utvoríme náhradnú plochu, ktorá dostatočne vyjadří topografickú plochu. Náhradnú plochu vo všeobecnosti vyjadruje funkcia:

$$z = P(y, x), \quad (10.3)$$

čo je výraz pre polynóm  $n$ -tého stupňa s premennými  $y$  a  $x$ , môže to byť napr.

- rovina určená tromi bodmi (obr. 10.5a):

$$z = ax + by + c, \quad (10.4)$$



Obr. 10.5. Jednoduché interpolačné plochy

- plocha druhého stupňa priamková (hyperbolický paraboloid obr. 10.5b):

$$z = ax^2 + bx + cy + d, \quad (10.5)$$

- alebo plochy II. a III. stupňa.

Pri rovine podľa vzorca (10.4) sa na interpoláciu používajú tri body. Pri priamkovej ploche podľa rovnice (10.5) sa používajú štyri body v rohoch štvorca alebo pravouholníka. Nadbytočný počet bodov dovoľuje optimalizovať zvolenú topografickú plochu s vyrovnaním metódou najmenších štvorcov.

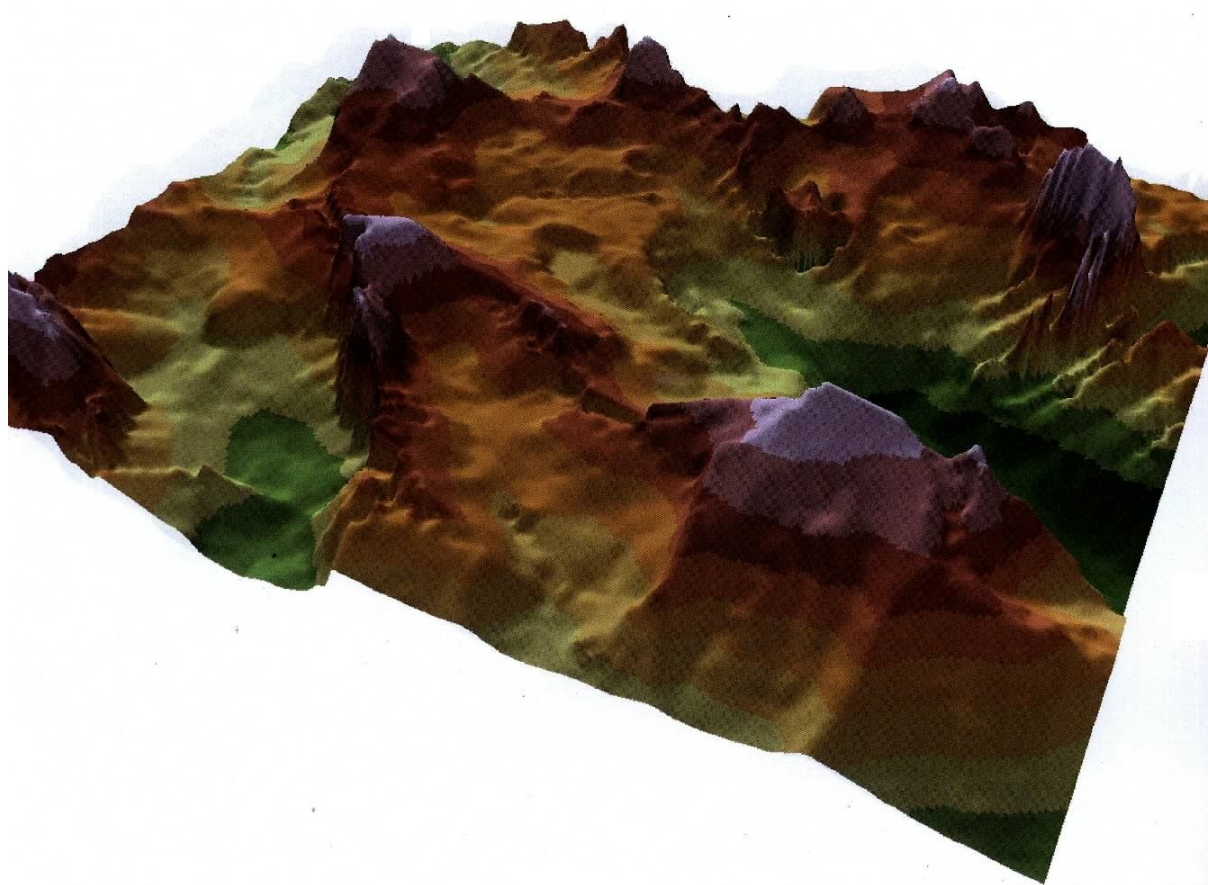
Interpolačný postup môže prebiehať v poradí:

1. čítanie súradníc bodu, ktorého výška sa má určiť,
2. pridelenie bodov DMR, ktoré sa majú použiť na interpoláciu,
3. výpočet koeficientov interpolačnej rovnice,
4. interpolácia výšok.



Vizualizácia terénneho reliéfu vyžaduje **konštrukciu vrstevníc** interpoláciou medzi odmeranými bodmi. Interpolácia vrstevníc je lineárna pri polyedrických modeloch zvyčajne trojuholníkového tvaru, nelineárna pri nepravidelných plochách ako je to uvedené rovnicami (10.3) až (10.5). Rôzne SW majú odlišný výber trojuholníkov. Interpolácia vyžaduje zadanie typov povinných spojnic hrán

Vnem priestorovej vizualizácie terénneho reliéfu docielime napr. farebným odlíšením prevýšenia medzi vrstevnicami (obr. 10.6). Vizualizovaný priestorový reliéf terénu je možné otáčať a meniť na neho pohľad.



Obr. 10.6. Vizualizácia terénneho reliéfu (Ing. Bagoňa)

DMR je možné spojiť s projektom (obr. 10.7) a tým napr. preskúmať estetickú stránku projektu stavby. V súčasnom období tvorí DMR topologický základ geografických informačných systémov.



Obr. 10.7. Spojenie reliéfu terénu s projektom (Ing. Lovásová)