

VPLYV VODIVEJ VRSTVY NA TVAR TELIES V ERT REZOCH

*Ivan Dostál*¹

Abstract

In the present time the ERT method is employed in the considerable measure by the problem solution in the geology, engineering geology and hydrogeology, as well as by the problem being solved environmental assignment. This paper deals influence of conductive layer over final imaging of inverse pseudo-sections produced by RES2DINV program. This problem is solved for the horizontal layered subsurface environment with the resistivity contrast 1/10 for Wenner-Schlumberger and dipole-dipole array over set of synthetic models.

Abstrakt

Metóda ERT je v súčasnosti v značnej miere používaná pri riešení úloh v geológii, inžinierskej geológii, hydrogeológii, ako aj pri riešení environmentálnych úloh. Článok sa zaoberá problematikou vplyvu vodivej vrstvy na celkový obraz inverzného ERT rezu získaného pomocou programu RES2DINV. Problém je riešený pre horizontálne zvrstvené prostredie s odporovým kontrastom 1/10 pre elektródové usporiadania Wenner-Schlumberger a dipól-dipól na sérii syntetických modelov.

Kľúčové slová

geoelektrické metódy, metóda ERT, modelovanie

1.0 Úvod

Elektrická tomografia (ERT), alebo 2D electrical imaging survey je široko používaná pri rôznych inžinierskych a environmentálnych problémoch (Putiška a kol., 2005), v hydrogeologickej, poľnohospodárskej a ropnej problematike, ako aj pri ťažbe nerastných surovín (Dahlin, 1996). V súčasnej dobe sa široko uplatňuje aj v archeologickom výskume. Dvojrozmerná elektrická tomografia sa obvykle vykonáva pomocou veľkého množstva elektród, 25 a viac, pripojených na viacžilový kábel (Griffiths a Barker, 1993).

V teórii dáva 3D tomografický prieskum presnejšie interpretačné modely, avšak v súčasnej dobe je 2D tomografický prieskum lepším ekonomickým riešením medzi presnosťou modelu a nižšími cenovými nákladmi. Hlavnou problematikou pri interpretácii údajov z geoelektrických meraní, ako aj pri iných geofyzikálnych meraniach je riešenie obrátenej úlohy (inverzný proces, alebo inverzia). Tá je z geofyzikálneho hľadiska nejednoznačná, čo znamená, že existuje viacero riešení zadanej úlohy. Z tohto dôvodu existuje viacero metód pre určenie najvhodnejšieho riešenia, ktoré sa časom neustále vyvíjajú a zdokonaľujú.

V súčasnosti už existuje množstvo interpretačného a modelovacieho softvéru aj oblasti ERT. Niektoré sa však líšia typom rozdelenia prostredia, algoritmom výpočtu inverzie, ako aj kvalitou zobrazenia výsledku. Tento článok sa zaoberá priamym modelovaním a inverziou ERT meraní v programoch RES2DMOD ver. 3.01.57 a RES2DINV ver. 3.58, ktoré publikoval M.H. Loke (1995-2009). Cieľom bolo zistiť vplyv vodivej vrstvy na prejav modelových telies v inverznom modeli prostredia.

2.0 Teória

Pri priamom modelovaní je rozloženie merného elektrického odporu horninového prostredia dané a cieľom je vypočítať zdanlivý merný elektrický odpor, ktorý môžeme namerať nad danou štruktúrou.

V programe RES2DMOD sú využité metódy konečných diferencií a konečných prvkov, ktoré rozdeľujú prostredie do určitého počtu blokov použitím pravouhlej siete a užívateľ môže špecifikovať hodnotu merného elektrického odporu v každej bunke. Metóda konečných diferencií je založená na metóde popísanej Deyom a Morrisonom (1979a), ale s modifikáciou podľa Loke (1994), zavádzajúcou korekciu pre malé nezrovnalosti v Deyovej a Morrisovej metóde rozdelenia prostredia.

Pri geofyzikálnom inverznom procese sa snažíme získať model, ktorého odozva je rovnaká ako aktuálne namerané údaje. Model je idealizovaná matematická predstava horninového prostredia. Obsahuje fyzikálne parametre, ktoré môžeme získať z nameraných údajov. Odozva modelu predstavuje syntetické údaje, ktoré môžeme vypočítať pomocou zadefinovaných vzťahov pre model s danými parametrami. Všetky inverzné metódy sa v podstate snažia určiť model prostredia, ktorého odozva súhlasí s nameranými údajmi v určitých medziach. V metóde použitej v programoch RES2DMOD a RES2DINV predstavujú modelové parametre skutočné hodnoty merného elektrického odporu vo forme buniek, zatiaľ čo namerané údaje obsahujú hodnoty zdanlivého merného elektrického odporu (Loke, 2004). Matematickú väzbu medzi modelovými parametrami a modelovou odozvou pre 2D a 3D odporové modely zabezpečuje metóda konečných rozdielov (Dey a Morrison 1979a, 1979b) alebo metóda konečných prvkov (Silvester a Ferrari, 1990).

Inverzný výpočet použitý v programe RES2DINV je založený na vyhladenej metóde najmenších štvorcov (smoothness-constrained least-squares method) (deGroot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992), ktorá je založená na rovnici :

$$(\mathbf{J}^T \times \mathbf{J} + \lambda \times \mathbf{F}) \times \mathbf{d} = \mathbf{J}^T \times \mathbf{g},$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_x \times \mathbf{f}_x^T + \mathbf{f}_z \times \mathbf{f}_z^T,$$

$\mathbf{f}_x$ = horizontálny plošný filter,

$\mathbf{f}_z$ = vertikálny plošný filter,

$\mathbf{J}$ = matica parciálnych derivácií,

λ = útlmový faktor,

$\mathbf{d}$ = model poruchového vektora,

$\mathbf{g}$ = vektor odchýlky.

3.0 Modelovanie

V problematike plytkej geofyziky sa najčastejšie stretávame s horizontálne zvrstveným prostredím. Z tohto dôvodu som v rámci modelovania zvolil modely troch horizontálnych vrstiev. Odporový kontrast vrstiev som zvolil 1/10. Všetky rozmery modelových telies som normoval na veľkosť elektródovej vzdialenosti (EV), t.j. každý rozmer je násobkom zvolenej vzdialenosti susedných elektród.

Tab 1: Parametre vytvorených modelov vrstevného prostredia

		Model	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8
		El. usporiadanie	W-S	W-S	W-S	W-S	d-d	d-d	d-d	d-d
1. vrstva		Hrúbka[EV]	1	1	1	1	1	1	1	1
		Merný el. odpor [Ω m]	10	10	10	10	10	10	10	10
2. vrstva		Hrúbka [EV]	1	2	3	4	1	2	3	4
		Merný el. odpor [Ω m]	100	100	100	100	100	100	100	100
3. vrstva		Hrúbka [EV]	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.
		Merný el. odpor [Ω m]	10	10	10	10	10	10	10	10
		Model	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
		El. usporiadanie	W-S	W-S	W-S	W-S	d-d	d-d	d-d	d-d
1. vrstva		Hrúbka [EV]	1	1	1	1	1	1	1	1
		Merný el. odpor [Ω m]	100	100	100	100	100	100	100	100
2. vrstva		Hrúbka [EV]	1	2	3	4	1	2	3	4
		Merný el. odpor [Ω m]	10	10	10	10	10	10	10	10
3. vrstva		Hrúbka [EV]	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.	nekon.
		Merný el. odpor [Ω m]	100	100	100	100	100	100	100	100
EV – elektródová vzdialenosť, W-S – Wenner-Schlumberger, d-d – dipól-dipól										

Parametre vytvorených modelov (hrúbka a merný elektrický odpor jednotlivých vrstiev) zobrazuje tabuľka 1.

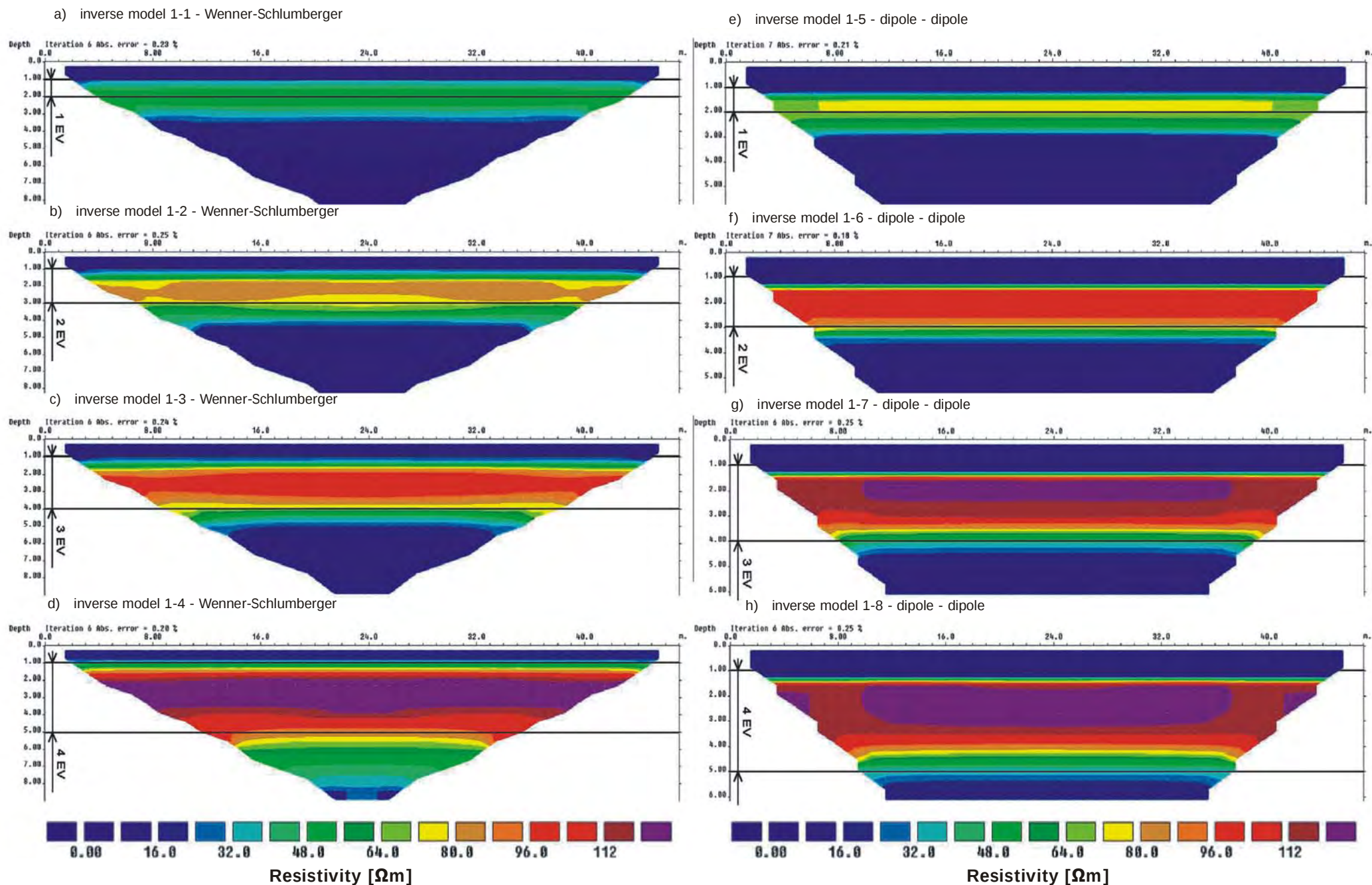
Pomocou programu RES2DMOD som vypočítal povrchovú odozvu každého modelu pre usporiadania Wenner-Schlumberger a dipól-dipól. Výsledky výpočtu som uložil do dátových súborov formátu RES2DINV bez započítania Gaussovho šumu. Tieto súbory som následne použil ako vstupné súbory pre program RES2DINV.

Inverzné modely boli vytvorené pomocou uvedeného programu RES2DINV s parametrami inverzného výpočtu, ktoré sú štandardne nastavené pri spustení programu.

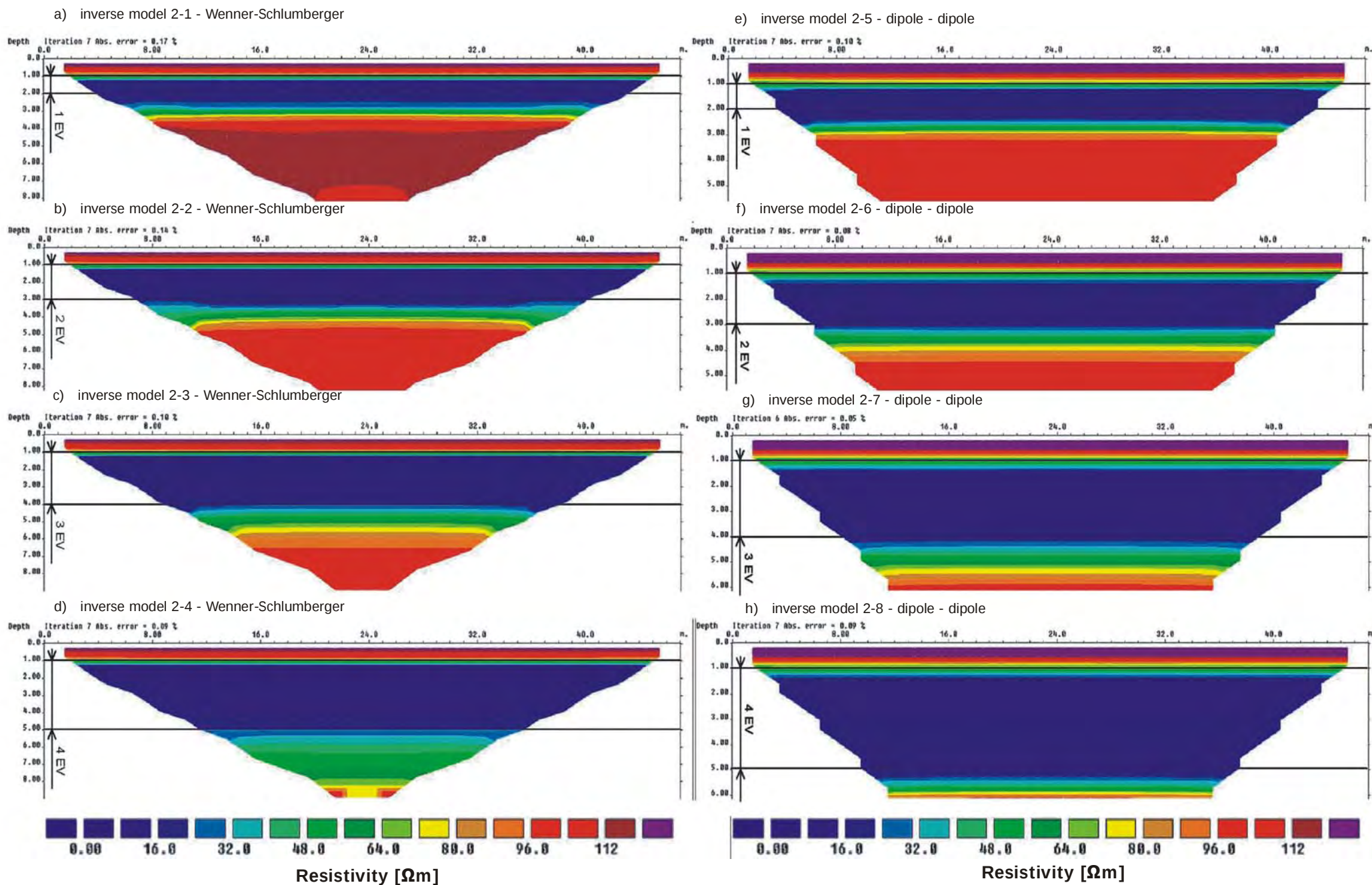
Výsledky sú prezentované formou inverzného odporového rezu v kontúrovom zobrazení (obr. 1 a 2).

4.0 Výsledky

Prvým typom modelov bola nevodivá vrstva vo vodivom prostredí (obr. 1). Pri usporiadaní Wenner-Schlumberger je vrstva s hrúbkou 1 EV (Obr. 1a) a rezistivitou 100 Ω m vo vodivom prostredí (10 Ω m) v inverznom výsledku posunutá smerom nadol (o 0,5 EV)



Obr. 1: Inverzné modely 1-1 až 1-8



Obr. 2: Inverzné modely 2-1 až 2-8

a hodnota merného elektrického odporu dosahuje len okolo 50% modelovej hodnoty. Následným zväčšovaním hrúbky nevodivej vrstvy sa hodnota merného elektrického odporu v inverznom výsledku približuje (obr. 1a – d) približne o polovicu EV. Dolné ohraničenie nevodivej vrstvy je posunuté iba v prvých dvoch prípadoch (obr. 1a, 1b). Pri hrúbke vrstvy 4 EV dosahuje hodnota merného elektrického odporu až 120% modelovej hodnoty (obr. 1d).

Ak použijeme elektródové usporiadanie dipól-dipól, modelovaná vrstva s hrúbkou 1 EV a hodnotou merného elektrického odporu 100 Ω m je v inverznom výsledku taktiež posunutá smerom nadol zhruba o jednu tretinu EV (obr. 1e). Inverzná hodnota merného elektrického odporu nevodivej vrstvy dosahuje 80% modelovej hodnoty. Pri hrúbke 2 EV (obr. 1f) už inverzná hodnota merného elektrického odporu nevodivej vrstvy dosahuje 100% modelovej hodnoty. Pri väčších hrúbkach inverzná hodnota merného elektrického odporu vrstvy stúpa až na 120% modelovej hodnoty. Horné ohraničenie vrstvy je pri modeloch 1-5 až 1-8 (obr. 1e až 1h) posunuté smerom nadol v rovnakej miere (okolo 1/3 EV). Spodné ohraničenie nevodivej vrstvy je presne určené pri hrúbke 2 EV (obr. 1f) a pri jej zväčšovaní má tendenciu sa posúvať smerom nahor (obr. 1g, 1h).

Druhým typom modelov bola vodivá vrstva v nevodivom prostredí (obr. 2). Pri obidvoch typoch usporiadaní (Wenner-Schlumberger a dipól-dipól) a pri všetkých hrúbkach vodivých vrstiev bola v inverzných výsledkoch dosiahnutá modelová hodnota merného elektrického odporu. Rovnako je to aj s určením polohy horného ohraničenia vodivej vrstvy, ktoré bolo veľmi presne určené vo všetkých prípadoch (obr. 2a až 2h). Spodné ohraničenie vodivej vrstvy je pri obidvoch použitých elektródových usporiadaniach a pri všetkých použitých hrúbkach vrstvy posunuté smerom nadol, generálne o 1 EV.

Z uvedených výsledkov je zrejmé, že efekty hĺbkového posúvania a hodnotového znižovania extrémov známe z teórie a praxe vertikálneho elektrického sondovania (VES) sa, napriek snahe o ich tlmenie, v určitej miere prejavujú aj vo výsledkoch inverzie ERT.

5.0 Diskusia

Zo zistených výsledkov teda možno usudzovať, že pri použití metódy ERT nad horizontálne zvrstveným prostredím, dochádza pri inverznom výpočte v programe RES2DINV k určitej deformácii vrstiev plyvom prítomnosti vodivej vrstvy v prostredí.

Pri usporiadaní Wenner-Schlumberger, ktoré je kompromisom medzi hĺbkovým dosahom a hustotou informácie (Loke, 1994) je program schopný určiť skutočnú hodnotu merného elektrického odporu nevodivej vrstvy vo vodivom prostredí až pri jej hrúbke 3 EV. Taktiež u tohto usporiadania nastáva problém pri určení ostrého rozhrania v dolnej polovici rezu, čo je už spôsobené nízkou hustotou informácie. Vodivá vrstva spôsobuje posun vrchného ohraničenia nevodivej vrstvy ležiacej pod ňou. Tento posun je generálne 1 EV. To môže výrazne ovplyvniť inverzný výsledok pri meraniach s väčšou elektródovou vzdialenosťou (EV).

Použitím usporiadania dipól-dipól dosiahneme značne vysokú hustotu informácie, ale na úkor hĺbkového dosahu (Loke, 2010), ktorý bude približne o jednu štvrtinu menší ako pri usporiadaní Wenner-Schlumberger, pri rovnakej dĺžke profilu. Reálnu hodnotu merného elektrického odporu nevodivej vrstvy vo vodivom prostredí tu dosiahne inverzný program pri jej hrúbke 2 EV. Pri tomto usporiadaní je však rovnaký vplyv vodivej vrstvy na určenie ohraničenia nevodivej vrstvy, ktorá leží pod ňou. Posun je generálne okolo 1 EV, čiže aj v tomto prípade, môžu nastať veľké skreslenia v inverznom výsledku, pri použití väčších EV.

6.0 Záver

Ak použijeme na inverzný výpočet program RES2DINV, prítomnosť vodivej vrstvy v prostredí ovplyvňuje určenie horného ohraničenia nevodivej vrstvy ležiacej pod ňou jej posunom smerom nadol. Takýto fenomén sa prejavuje pri odporovom kontraste 1/10 a pri použití usporiadaní Wenner-Schlumberger a dipól-dipól. Je preto potrebné s týmto fenoménom uvažovať pri interpretácii vrstevných rozhraní. V ďalšom bude potrebné vyšetriť, ako sa tento jav bude prejavovať pri iných odporových kontrastoch.

Tento článok bol napísaný v rámci projektu APVV-0158-06.

Literatúra

- DAHLIN, T.: 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, *First Break*, 14, 1996, p. 275-284.
- de GROOT-HEDLIN, C. and CONSTABLE, S.: Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magneto-telluric data, *Geophysics*, 55, 1990, p. 1613-1624.
- DEY, A. and MORRISON, H.F.: Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures, *Geophysical Prospecting* 27, 1979a, p. 1020-1036.
- DEY, A. and MORRISON, H., F.: Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures, *Geophysics* 44, 1979b, and p. 753-780.
- GRIFFITHS, D., H. and BARKER, R., D.: Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology, *Journal of Applied Geophysics*, 29, 1993, p. 211-226.
- LOKE, M., H.: The inversion of two-dimensional resistivity data, *Unpubl. PhD thesis*, University of Birmingham, 1994.
- LOKE, M., H.: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys, www.geoelectrical.com/downloads.php, 2010.
- SASAKI, Y.: Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation, *Geophysical Prospecting*, 40, 1992, p. 453-464.
- PUTIŠKA, R., MIKITA, S., VYBÍRAL V.: Geofyzikálne a hydrogeologické modelovanie starých environmentálnych záťaží, *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební*, Roč. 5, č. 2 Ostrava : Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2005. – S, p. 121-128
- SILVESTER, P., P. and FERRARI, R., L.: Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.), Cambridge University Press, 1990.

¹Autor:

Mgr. Ivan Dostál - Univerzita Komenského, Prírodovedecká fakulta, 842 15 – Bratislava, Slovenská Republika, dostal@fns.uniba.sk