SZAKDOLGOZAT

Háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda modellezése véges elemes módszerrel

Szijártó Márk

Fizika BSc.

Geofizikus szakirány



Témavezető:

Dr. Galsa Attila egyetemi adjunktus

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Geofizkai és Űrtudományi Tanszék

2015

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni Galsa Attilának, hogy elvállata a témavezetést, valamint lelkiismeretes munkájával folyamatosan lektorálta az egyes tesztelések végkimenetelét. Továbbá hálával tartozom Drahos Dezsőnek, aki építőjellegű tanácsaival segítette munkámat. Köszönöm a Geo-Log Kft.-nek a lehetőséget, hogy testközelből is megvizsgálhattam egy háromelektródás laterolog szondát. Ezenkívül köszönöm mindazoknak, akik elolvasták és véleményezték a készülő szakdolgozatot.

Budapest, 2015. május 22.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés				
	1.1.	A geofizika definíciója	1	
	1.2.	A Föld felszínén és a felszín közelében végzett mérések általános jel-		
		lemzése	1	
	1.3.	Mélyfúrási geofizikai alapismeretek	2	
		1.3.1. Történeti kitekintés	2	
		1.3.2. A fúrás és a fúrólyuk környezete	3	
		1.3.3. Porozitás	4	
		1.3.4. Szaturáció	5	
		1.3.5. Fajlagos ellenállás	5	
		1.3.6. A geofizikai információszerzés	6	
2.	Elle	nállás-szelvényezés	7	
	2.1.	Előzmények	7	
		2.1.1. Potenciál szonda	7	
		2.1.2. Alapvető problémák	7	
		2.1.3. Egy lehetséges elméleti megoldás	8	
	2.2.	A háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda működése .	9	
	2.3.	Modellezés	10	
3.	A v	éges elemes modell	12	
	3.1.	Modellgeometria	12	
	3.2.	Matematikai háttér	16	
	3.3.	Határfeltételek, definíciók, paraméterek	17	
4.	Ere	dmények bemutatása	19	
	4.1.	Látszólagos fajlagos elektromos ellenállásérték	19	
	4.2.	A fúróiszap hatása	20	
	4.3.	Réteghatár jelenléte	23	
	4.4.	Ágyazott réteg jelenléte	26	
	4.5.	A szonda radiális érzékenysége	31	
	4.6.	A szonda érzékenysége komplex elméleti elrendezésnél	34	

	4.7.	A szonda	viselke	dése va	lós sze	elvény	alapjá	án ké	szített	mo	dellel	ren-	
		dezésben				•••							39
5.	Össz	zegzés											42
Hi	vatk	ozások											44
N	yilatl	kozat											46

Ábrák jegyzéke

1.1.	Egy fúrás környezetének modellje	4
2.1.	A potenciálszonda és problémája	8
2.2.	Védőelektródákkal ellátott szonda áramvonal-eloszlás karakterisztikája	10
3.1.	A szondamodell eredeti és egyszerűsített felépítése	13
3.2.	A teljes modell	15
3.3.	A modell véges elemes felosztása	15
3.4.	Áramvonalkép és potenciáleloszlás egy alapesete	18
4.1.	A fúróiszap hatása LL3 és LL7 szondamodell esetén	22
4.2.	A fúróiszap hatásának korrigálása (K_d) d függvényében	22
4.3.	Áramvonalkép és valós fajlagos ellenállás horizontális réteghatárnál $% \mathcal{A}$.	25
4.4.	Látszólagos fajlagos elektromos ellenállás görbe réteghatárnál	25
4.5.	Látszólagos fajlagos elektromos ellenállás görbe ágyazott réteg esetén.	28
4.6.	Korrekció (K_{H}) az ágyazott réteg H vastagságának függvényében $% M_{H}$.	28
4.7.	Látszólagos fajlagos elektromos ellenállás értékek vékonyréteg esetén $% \mathcal{A}$.	30
4.8.	Áramvonalkép és potenciáleloszlás radiálisan rétegzett közegben $\ .\ .$	32
4.9.	A szonda oldalirányú érzékenysége	33
4.10.	Látszólagos fajlagos elektromos ellenállás görbe komplex elméleti el-	
	rendezés esetén	37
4.11.	Látszólagos fajlagos ellenállás értékek d függvényében	38
4.12.	Korrekció $(K_c) \ H = 1$ m vastagságú ágyazott rétegnél d függvényében	38
4.13.	Valós szelvény alapján készített modellelrendezés ellenállásgörbéi	41
5.1.	Az eredeti háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda	43

Táblázatok jegyzéke

1.1.	A mélyfúrási geofizikában használatos alapeljárások	6
3.1.	A véges elemes modell elektronikai paraméterei	14
4.1.	A fúróiszap hatásának vizsgálatánál kapott látszólagos fajlagos elekt-	
	romos ellenállásértékek	21
4.2.	A fúróiszap hatásának korrigálása d függvényében	21
4.3.	Korrekció $(K_{\cal H})$ az ágyazott réteg vastagságának $({\cal H})$ függvényében $% {\cal H}$.	29
4.4.	A szonda oldalirányú érzékenysége	33

4.5.	A szonda általános érzékenységére vonatkozó adatok és korrekciós	
	értékek (K_c)	36
4.6.	Egy délnyugat-lengyelországi előszudéta monoklinális szerkezetű valós	
	szelvényre vonatkozó paraméterek	39

1. Bevezetés

1.1. A geofizika definíciója

Napjainkra az egyetemes természettudomány olyan komplexszé vált, hogy rengeteg ágát különböztethetjük meg. Ilyen például a fizika, kémia, biológia, földtudomány, melyek egy-egy határterületen rendkívül szoros kapcsolatban vannak egymással. Ezért nagy hiba lenne ezeket teljes mértékben szétválasztani. Ezek a tudományok tették lehetővé, hogy elméleti ismereteink és gyakorlati tapasztalataink birtokában már rengeteg problémát meg tudtunk oldani az idők során.

Az egyik ilyen tudomány maga a geofizika, mely a Föld belsejében, felszínén, szűk, illetve tágabb környezetében végbemenő természetes és mesterséges módon keletkező fizikai jelenségek megfigyelésével, magyarázatával foglalkozó földtudomány [1].

1.2. A Föld felszínén és a felszín közelében végzett mérések általános jellemzése

Mérőműszereink nagy része mechanikai, elektronikai, precíziós eszköz, melyet geofizikusok és mérnökök terveznek, illetve fejlesztenek. A mérési eljárásokról általánosan elmondható, hogy valamely természetes vagy mesterséges erőtér jelenlétében mérjük a (létrehozott) mező tulajdonságait vagy annak megváltozását (pl.: gravitációs, földmágneses, geoelektromos kutatások). Eme erőtérvizsgálatokon kívül a Föld belsejében elhelyezkedő határokon megtörő hullámokat is meg tudjuk figyelni, melyek szintén lehetnek mesterséges, illetve természetes forrásúak (pl.: szeizmikus, illetve szeizmológiai megfigyelések). Ezekből az eljárásokból származó mért értékekből tudunk következtetni a kőzetek fizikai paramétereire. A mérőműszerekből beérkező, rendezett adatokat előre elkészített vagy fejlesztés alatt álló programok segítségével feldolgozzuk, majd értelmezzük [2]. A geofizikai kutatási módszereket két nagy csoportra bontjuk:

- 1. mélyfúrási geofizika,
- 2. felszíni geofizika.

Mindkét esetben hasonló eljárásokon alapuló vizsgálatokat végezhetünk, azonban a mérőberendezések konstrukciója teljesen más (a környezetnek megfelelően). Fontos

kitétel, hogy mi a vizsgálat célja, mit keresünk. Tehát egy összetett földtani kutatás során érdemes több módszer és eszköz segítségével alátámasztani feltevéseinket. Sajnos azonban mérőműszereink használhatósága korlátozott. Működésüket befolyásolják a földtani adottságok, az éghajlat, és sok esetben maga a műszerjárás is. A mélyfúrási geofizikai kutatások követelik meg a legnagyobb eszközigényt és anyagi hátteret. Ezt a metódust a felszíni geofizikai kutatásokhoz képest jó közelítéssel tekinthetjük "in situ" módszernek, hiszen ezeknél az eljárásoknál a kőzet közvetlen közelében mérünk.

1.3. Mélyfúrási geofizikai alapismeretek

Mélyfúrási geofizikai méréseket számos célból végeznek a világban. Létesítenek földtani, geotermikus, hidrogeológiai és nyersanyagkutatásokra használt fúrólyukakat. Természetesen utóbbiból van a legtöbb, hiszen életünkhöz mára nélkülözhetetlenné vált a szénhidrogén forrásokból előállított energia. Az elmúlt évtizedekben ezért, égetően fontossá vált eme kutatási terület fejlesztése.

Mielőtt a háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda működését, használatát, modellezését és tesztelését megismerjük, szükségünk van néhány alapfogalomra, melyeket ebben a fejezetben tárgyalok. Tulajdonképpen ezek teszik világossá, hogy a méréseink során kapott adatokból milyen kőzettani sajátosságokra következtetünk.

1.3.1. Történeti kitekintés

1927. szeptember 5-én a francia *Schlumberger testvérek* elvégezték első eredményes lyukmérésüket a franciaországi Pechlebronn-ban. Ez volt az első szelvényezés, mellyel megszületett a mélyfúrási geofizika. Azelőtt rendkívül szegényes információgyűjtést tudtak csak végrehajtani. 1929-ben *Doll* potenciálmérő műszerével már el tudta választani a permeábilis (áteresztő) rétegeket a többitől. Az 1930-as években a természetes potenciált mérő szondák mellett megjelentek a kőzetek fajlagos ellenállását mérő berendezések. Mindemellett, az eszközöket már felszerelték hőmérsékletmérővel, irányt (elhajlást) rögzítő berendezéssel, illetve kihasználták a természetes gamma-sugárzás detektálásának lehetőségét, mely a közeg agyagtartalmának kimutatására vált alkalmassá. 1941-ben Archie megalkotta egyszerű, empirikus összefüggéseit, melyek kapcsolatot teremtenek a kőzetek fajlagos elektromos ellenállása, porozitása és a porózus közeget kitöltő fluidum (víz) szaturációja között. Az 1940-es évek legvégén a II. világháború termékeként jelent meg az indukciós szonda.

1951-ben *Owen* és *Greer* amerikai szakemberek írtak cikket **a védőelektródás** ellenállás-szelvényezés lehetőségéről, elméleti hátteréről és saját tapasztalataikról [14]. A tervezők elsőként a három, majd eme modell alapján a precízebb hét és kilenc elektródás fókuszált áramterű szonda konstrukcióját valósították meg. Az 1950es évek végére elkészült az első gamma-gamma sűrűségmérő berendezés. Azonban, akusztikus méréseket futási idő átlagolási problémák miatt, csak az 1960-as évek elejétől végeztek.

Annak ellenére, hogy a manapság is rendelkezésre álló mérőeszközök alapstruktúráját körülbelül az 1970-es évek végére megvalósították, a kirobbanó fejlődés csak ezután következett. Fejlettebb technika segítségével sokkal hatékonyabb szondavonatokat tudtak építeni, és az adatok rögzítését már digitális formában végezték. Napjainkban is rengeteg újítást vezetnek be. Ilyen például a lyukfalkamerázás, amely lehetőséget teremt nem csak a fúrólyuk minőségének vizsgálatára, hanem a rétegek dőlésirányának megállapítására is [3].

1.3.2. A fúrás és a fúrólyuk környezete

A fúrólyuk és környezetében a matematika kezelhetőség miatt általában hengerszimmetriát feltételezünk, melynek tengelye a fúrólyuk középvonala. A mérőberendezés és a kőzet között a konduktív kapcsolatot a **fúróiszap** biztosítja. Első közelítésben azt feltételezzük, hogy ez az anyag csak a henger alakú fúrólyukat tölti ki. Ennek értelmében adataink feldolgozásakor mindenképpen számolni kell a fúróiszap módosító hatásával. Pontosabb modellek esetén figyelembe vesszük az **elárasztott/ kiöblített zóna** jelenlétét. A fúrólyukban uralkodó túlnyomás esetén, a permeábilis zóna átfúrásakor az **iszapfiltrátum** beáramlik a pórustérbe, kiszorítva az eredeti pórustartalmat a fúrólyuk környezetéből. Ennek eredményeként jön létre az elárasztott zóna, amely már eltérő fizikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint az ezen kívüli **érintetlen/távoli zóna**. Az elárasztott zóna radiális kiterjedése átlagosan 0, 1 – 1,0 m közé esik [4]. Valósághűbb modellek esetén az elárasztott és az érintetlen zóna



1.1. ábra. Az alábbi ábrán egy bonyolult, de matematikailag kezelhető fúrólyuk és környezetének hengerszimmetrikus modellje látható, ahol h a permeábilis réteg vastagsága, d_h a fúrólyuk átmérője, h_{mc} az iszaplepény vastagsága, d_i az elárasztott zóna átmérője és d_j az átmeneti zóna átmérője. Az érintetlen zóna horizontális kiterjedését végtelennek tekintjük az átmeneti zónától kezdődően. A különböző indexszel ellátott S a szaturációt, R a fajlagos elektromos ellenállás értékeket jelöli az adott zónában [5].

filtrátum fizikai tényezőket befolyásoló hatása lecseng. A 1.1. ábrán egy aránylag bonyolult fúrólyuk és környezetének modelljét láthatjuk.

1.3.3. Porozitás

A kőzetszemcsék nem töltik ki tökéletesen a rendelkezésükre álló teret, köztük pórustérfogat található.

A porozitást a kőzet fajlagos hézagtérfogatával definiáljuk:

$$\Phi = \frac{V_p}{V_t},\tag{1.1}$$

ahol Φ a kőzet (totális) porozitása, V_p a pórus és V_t a kőzet teljes térfogata.

Természetesen, megfelelően osztályozott kőzetek esetében a pórustérfogat nagyobb lehet, míg kevésbé osztályozott eloszlásnál kisebb szemcsék töltik ki a nagyobbak közti tér egy részét, csökkentve így a porozitást. Figyelembe vesszük, hogy a pórustérfogatban jelen levő víz egy része adszorpciós erővel kötött, és nem mozdítható el. Ezért bevezetjük az effektív porozitást (Φ_{eff}) [6].

1.3.4. Szaturáció

A szaturáció a kőzetben lévő adott típusú fluidum térfogatának aránya a pórustérfogathoz képest [7]:

$$S = \frac{V_f}{V_p},\tag{1.2}$$

aholSa szaturáció, V_{f} az adott típusú fluidum és V_{p} a pórus térfogata.

Azonban, ha a hézagtérfogatot többféle fluidum tölti ki (víz, olaj, gáz), akkor ezeket különböző módon vesszük figyelembe, és más-más indexszel látjuk el. Ezek összege matematikailag 1, tehát 100%.

EGY VALÓS PROBLÉMA EGYSZERŰ MEGOLDÁSA: Számításainkban a víztelítettség-értékek alapján adunk becslést a közeg szénhidrogén telítettségéről. Ha megvizsgálunk egy elárasztást, akkor az elárasztott zóna víztelítettségének (S_{xo}) és az érintetlen zóna víztelítettségének (S_w) különbségeként kapjuk meg a kitermelhető szénhidrogén hányadát (S_{CHM}) :

$$S_{CHM} = (1 - S_w) - (1 - S_{xo}) = S_{xo} - S_w.$$
(1.3)

Ezen az egyszerű példán látjuk, mennyire fontos, hogy a különböző fluidumokhoz tartozó szaturációt meg tudjuk állapítani.

1.3.5. Fajlagos ellenállás

A kőzetek fajlagos ellenállásának megállapítása alapvető fontosságú, mind a felszíni, mind a mélyfúrási geofizikai mérésekben. Maga a mérés elmélete azon alapszik, hogy általában jelentős fajlagos ellenálláskontraszt figyelhető meg a kőzetmátrix és a pórustérfogatot kitöltő fluidum között [6]. Azzal a legtöbb esetben jó közelítéssel élünk, hogy maga a kőzetmátrix szigetelő. Tehát méréseinkből a pórusfolyadék fajlagos elektromos ellenállás értékére következtetünk, mely függ a fluidum mennyiségétől, minőségétől, a rétegvíz ionkoncentrációjától és a hőmérséklettől. Ha ismerjük a mélyben lévő rétegvíz fajlagos elektromos ellenállását (R_w) , az még nem jelenti azt, hogy ez az említett rétegvízzel teljesen kitöltött kőzet ellenállásértékével (R_o) egyenlő. Tapasztalatai alapján, Archie írt fel összefüggést a két érték között:

$$R_o = F R_w, \tag{1.4}$$

Mérési eljárás	Mért paraméter	Geofizikai paraméter
Fajlagos elektromos ellenállás	Feszültség	Porozitás, agyagosság
Rugalmas hullámok terj.	Terj. idő, csillapítás	Porozitás, hasadékosság
Term. potenciál	Feszültség	Agyagosság, permeabilitás
Term. gamma-sugárzás	Beütésszám	Litológiai összetétel
Gamma-gamma-szelvényezés	Szórt gamma-sugárzás	Porozitás, gáztartalom
Neutron-szelvényezés	Beütésszám	Porozitás, gáztartalom

1.1. táblázat. A táblázat a mélyfúrási geofizikában használt, alapeljárásokkal mért, és a belőlük származtatott geofizikai paraméterek kapcsolatát tükrözi, közvetítő paraméterek nélkül [9]. A felsorolás informatív jellegű.

F a formáció faktor, melyet Archie a kőzet porozitásából származtatott[8]:

$$F \approx \frac{a}{\Phi^m} \approx \frac{1}{\Phi^2},\tag{1.5}$$

ahol m a kőzet minőségétől függő cementációs kitevő és a a tortuozitási tényező, melyet – egyéb információ hiányában – a gyakorlatban a = 1-nek és m = 2-nek veszünk. Eme formulák alapján juthatunk el azokig az egyszerű összefüggésekig, melyek segítségével később meg tudjuk állapítani például a teljes, illetve a kitermelhető szénhidrogén hányadát (ld. 1.3.4. alfejezet). A kőzetekre vonatkozó fajlagos ellenállás érték megállapítása rendkívül fontos.

1.3.6. A geofizikai információszerzés

A mélyfúrási geofizika fő feladata, hogy információt szolgáltasson az átfúrt kőzetek, tárolók tulajdonságairól. Ugyanakkor a porozitást, a szaturációt és a kőzetmátrix összetételét nem tudjuk közvetlenül mérni. A céltudatos műszer- és módszerfejlesztés eredményeképpen alakult ki az a mérési apparátus, amelyből egy adott fúrás céljának legoptimálisabb szelvényezési programját össze lehet állítani. A 1.1 táblázatban összefoglaltam a mért és a geofizikai paraméterek közötti kapcsolatokat a legfontosabb eljárásoknál. A felsoroltak mindegyikéhez számos műszert fejlesztettek/fejlesztenek, és használnak az adott kutatási célnak megfelelően.

Dolgozatomban a kőzetek fajlagos elektromos ellenállásérték meghatározására alkalmas, háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda véges elemes modellezéséről számolok be részletesen.

2. Ellenállás-szelvényezés

2.1. Előzmények

2.1.1. Potenciál szonda

Ahogy azt a 1.1. táblázatban olvashattuk, közvetlenül nem tudjuk megmérni a kőzetek fajlagos ellenállását. Az első berendezések elméleti modelljének meglehetősen egyszerű felépítése a 2.1a ábrán látható. Két áramkört használunk, melyek egyik végét földeljük (M), a másikat pedig elektromos pontforrásként használjuk (A). Mindkét különböző áramkör pontelektródája a fúrólyukban helyezkedik el. A szondán lévő két elektróda között előre definiált távolságkülönbség van. Természetesen minél nagyobb ez a távolság, annál nagyobb a módszer behatolóképessége, az Melektródán mért potenciál annál inkább a távolibb réteg fajlagos ellenállására lesz jellemző.

Az A áramelektróda I áramot bocsájt be környezetébe. Az M elektródával pedig egy általunk választott referenciaponthoz képesti feszültségértéket mérünk. Ha homogén, végtelen közegben megoldjuk a pontszerű áramforrásra vonatkozó *Laplaceegyenletet* – gömbi koordináta-rendszerben –, a megfelelő peremfeltételeket figyelembe véve, eljutunk a következő összefüggésig [4]:

$$R_t = 4\pi r \frac{V_M}{I} = K_{pot} \frac{V_M}{I}, \qquad (2.1)$$

ahol R_a a látszólagos fajlagos elektromos ellenállás, r a két pontelektróda közti távolság, V_M az M elektródán mért feszültségérték, és I az A áramelektródán közölt egyenáram erőssége. A geometriai paramétereket figyelembe véve kapjuk a K_{pot} szondakoefficienst, mely egy adott geometriájú potenciálszondára jellemző állandó.

2.1.2. Alapvető problémák

A 2.1a ábrán látható berendezés két alapproblémát hordoz magában. Abban az esetben, ha a fúrólyuk átmérője elér egy kritikus értéket, a műszer érzéketlen lesz a vizsgálni kívánt környezetre. Különösen akkor, ha a lyukban lévő fúróiszap sokkal jobb vezetőképességgel bír, mint a lyuk környezete. Tehát az áram ahelyett, hogy behatolna a formációba, a fúróiszapon keresztül jut el a mérőelektródáig.

A második fő probléma akkor áll fent, ha egy vékony réteg sokkal nagyobb el-



2.1. ábra. (a) Egy potenciálmérő szonda felépítése, ahol I áramerősséget bocsájtunk az A áramelektródból, és a tőle r távolságban lévő M mérőelektródával mérünk egy referenciaponthoz képesti feszültségértéket. (b) A normál és a fókuszált áramterű szonda elvi működése látható, melynél R_t a vékony, R_s az ágyazó réteg, R_m a fúróiszap fajlagos ellenállása [10].

lenállással bír, mint az őt körülvevő ágyazóréteg. Ilyenkor a fúróiszap biztosít lehetőséget arra, hogy a nagy ellenállású réteg helyett az áramtér a kisebb ellenállású ágyazórétegen keresztül zárja az áramkört [11]. Tehát a számított fajlagos ellenállás nem a vékony rétegre lesz jellemző.

2.1.3. Egy lehetséges elméleti megoldás

Az előzőekben tárgyalt problémák módosító hatását a kibocsájtott áramtér irányának befolyásolásával próbálták csökkenteni. A 2.1b ábrán egy egyszerű normál (unfocused) és egy fókuszált (focused) áramterű pontelektróda áramterének képe látható. Középen egy $R_t >> R_s$ ellenállású ágyazott réteg található, ahol R_t a vékony réteg, R_s az ágyazóréteg fajlagos elektromos ellenállása. Fókuszált áramtér esetén rábírhatjuk a mérőpászmát, hogy behatoljon a nagy fajlagos ellenállású rétegbe [7]. Matematikailag a fókuszálás ötlete megvalósítható, ha az áramsűrűség-vektor fúrólyukra merőleges (normális) komponensét maximalizáljuk, így növelve a szonda radiális behatolóképességét. Ezen az elven működnek azok a mérőberendezések, melyet a szakirodalom Laterolog, LL3, LL7, LL9, Dual Laterolog, MicroLaterolog szondáknak hív.

2.2. A háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda működése

Az előzőekben vázolt elméleti lehetőséget vizsgálva született meg a *laterolog-elv* [12], majd ezt követte az első **három elektródás fókuszált áramterű szonda**, röviden **LL3** konstrukciója. A 2.2a ábrán az első háromelektródás fókuszált áramterű laterolog-szonda elrendezése látható egy eredeti cikk alapján. A szonda elvi megvalósításának legfontosabb részei:

- Mérőelektróda (A₀): amelyből a fókuszált áramvonalak lépnek ki.
- Felső, illetve alsó védőelektróda (A_u, A_d): melyek segítségével fókuszáljuk a középső mérőelektródán kilépő áramvonalak irányát.
- Visszatérő áramelektróda (B): ahol záródik az áramkör.

Ezen egyszerű modell alapján is látszik, hogy itt már alapvetően eltértek a pontelektródát használó egyszerűsített elméleti modelltől. A két hosszú, ekvipotenciális védőelektróda célja, hogy a középső elektródán kilépő áramsűrűségtér – jó közelítéssel – merőleges legyen a lyuk falára. A fókuszálásnak köszönhetően nő a mérőelektródán kilépő áramvonalak oldalirányú behatolóképessége. Homogén, végtelen kiterjedésű, izotróp közeg esetén egy horizontális kiterjedésű, korongalakú áramsűrűségtér jön létre, melynek vastagsága közelítőleg megegyezik a mérőelektróda hosszával (2.2b ábra).

Ha mérjük a mérőelektródán kilépő áram erősségét (I) és egy referenciaponthoz képesti potenciálkülönbséget (V), akkor a (2.1) egyenlettel szinte megegyező összefüggést kapunk:

$$R_a = K_{LL3} \frac{V}{I} \tag{2.2}$$

ahol R_a a látszólagos fajlagos elektromos ellenállás és K a háromelektródás laterolog szondára jellemző szondakoefficiens. A legegyszerűbb modellre és környezetre vonatkozó látszólagos és valódi fajlagos elektromos ellenállás értékek közti kapcsolatot empirikus formában megadták.

Általánosságban az mondható el, hogy a védőelektródák hossza a szonda oldalirányú behatolóképességével, míg a mérőelektróda hossza a vertikális felbontóképes-



2.2. ábra. (a) Az első védőelektródákkal ellátott szonda működési elvének konstrukciója a műszer különböző részeivel egy korabeli cikk alapján [14]. (b) A védőelektródákkal fókuszált áramvonal-eloszlás elméleti alakja.

ségével arányos. Tehát a mérőelektródán kilépő áramvonalak irányításával, fókuszálásával lehetőség nyílt arra, hogy a jó vezetőképességű fúróiszap és az elárasztott zóna befolyásoló hatását csökkentsék. Az első háromelektródás eszközöket már eredményesen használták szénhidrogén kutatófúrásokban [14]. Napjainkban a hármas laterologot kis mélységű nyersanyagkutató (pl.: víz, szén, urán) fúrásoknál alkalmazzák.

2.3. Modellezés

A fúrólyuk modellezéseket általában kétdimenziós hengerkoordináta-rendszerben végzik, kihasználva az elrendezés geometriájának szimmetriáját. Egy elektromos mérőberendezés működését a *Maxwell-egyenletrendszer* egyszerűsítéséből levezethető *Laplace-egyenlet* ((3.11) egyenlet) segítségével tudjuk vizsgálni. Mindezzel tulajdonképpen a gyakorlatban használt szondák várható válaszjelét számítjuk.

Három út járható egy konstrukció modellezése során. Az 1950-es évektől kezdődően alkalmaznak **analóg szimulációkat**. Ezeknél az eljárásoknál a hengerszimmetrikus fúrólyuk körül gyűrű alakú, axiális elhelyezkedésű, különböző fajlagos elektromos ellenállású formációkat helyeznek el. Ez egy mesterséges tesztmérésnek fogható fel. A "fúrólyukban" lévő gyűrű alakú elektróda segítségével vizsgálják a válaszjeleket. Ezzel az eljárással figyelembe tudják venni a fúróiszap és az elárasztott zóna hatását is.

A probléma **analitikus megoldásának** elve egy következő lehetőség. Egy hengerszimmetrikus koordináta-rendszerben az áramsűrűség-vektort három komponensre bonthatjuk, melyek közül az azimutális komponenst elhanyagoljuk. Így a henger forgási tengelyén lévő rögzített ponthoz képest (mérőelektróda) – a *Laplace-egyenlet* segítségével – kiszámítható egy tetszőleges ponthoz képesti potenciálérték. Az analitikus megoldások hátránya viszont, hogy nehezen kezelik a valóságban fellépő inhomogenitásokat (pl.:[15], [16], [17]).

A rohamosan fejlődő számítógépes technika viszont lehetővé tette a komplikáltabb elrendezések és mérőműszerek **numerikus** modellezését is. A bonyolult geometriát is jól kezelő véges elemes módszert 1977-ben alkalmazták először szondák modellezésére [18]. A modellt egy jól meghatározott paraméterekkel rendelkező rácstérre osztjuk. A program ezeken a rácsterületeken oldja meg a *Laplace-egyenletet*, megfelelő határfeltételek mellett. A dolgozatban bemutatott szondamodellezés is hasonló eljárással történt.

3. A véges elemes modell

3.1. Modellgeometria

A numerikus modell felállítása a **COMSOL Multiphysics 4.2a** véges elemes numerikus programcsomag segítségével történt [19]. A működőképes szondamodellt témavezetőm készítette el. A szonda részletes felépítését a 3.1a és b ábra mutatja. A mérőberendezés teljes hossza csaknem 10 m, ezért a 3.1 ábra nem méretarányos. A henger alakú alsó (A_d) és felső (A_u) védőelektróda, a mérő- (A_0) és a visszatérő (B)elektróda a műszer legfontosabb részei. A szonda fém részeit sötétszürke, szigetelő darabjait pedig világosszürke árnyalattal különböztettem meg. Az ezekre vonatkozó fajlagos elektromos ellenállásérték a 3.1. táblázatban látható. A 3.1b ábra az eredeti tervrajz alapján készített kétdimenziós, forgásszimmetrikus modellt mutatja. A modell geometriájának rögzítése az alábbiak felhasználásával történt:

- A modell hengerszimmetriája miatt feltételezzük, hogy az áramsűrűség azimutális komponense zérus. Az áramsűrűség-vektornak így csak a másik kettő komponensét vesszük figyelembe: j_r-t és j_z-t. Ezért kétdimenziós a teljes modell [20].
- 2. A védőelektródák és a mérőelektróda áramforrását egy darab vonalforrásként definiáljuk.
- 3. A visszatérő elektróda áramforrását pontelektródaként értelmezzük.

Miután a szonda számítógépes konstrukciója elkészült, megfelelő közeget kellett biztosítani működésének tesztelésére. A 3.2. ábrán látható a teljes numerikus modell háromdimenziós elrendezése. A konkrét méretek fizikai hátterére a későbbiek során térek ki. A hengerszimmetria miatt **axiszimmetrikus** (r, z) síkú koordinátarendszert használunk, melynek origójában a mérőelektróda helyezkedik el. A közegmodell tartalmazza a 2000 m sugarú és magasságú **modellhengert**, a 30 m sugarú és 60 m magasságú **belső modellhengert**, a 0,1 m sugarú és 200 m magasságú **fúrólyukat**, valamint a 9,95 m hosszúságú és 0,0315 m maximális sugarú mérőműszert.

A szondát és környezetét háromszög alakú véges elemekkel diszkretizáltam, a potenciálteret az elemeken belül másodfokú *Lagrange-polinomokkal közelítettem*.



3.1. ábra. (a) A szonda tervrajza alapján készített metszet a mérőszeszköz részeinek megnevezéseivel és méreteivel. (b) A szondamodell egésze kétdimenziós perspektívában. Itt a henger alakú mérőeszköz forgástengelye a vertikális (z) koordinátatengely, a mérőelektróda közepe pedig az origoban van, (r) a radiális tengely.

Paraméter	Jelölés	Érték	M.e.
Az összes kilépő áram $(I_0 + I_u + I_d)$	I_A	100	mA
Visszatérő elektródába belépő áram	I_B	-100	mA
A fém részek fajlagos el. ellenállása	R_{met}	10^{-7}	Ωm
A szigetelő részek fajlagos el. ellenállása	R _{ins}	10^{7}	Ωm
A fúróiszap fajlagos el. ellenállása	R_m	1; 10	Ωm
Az érintetlen zóna fajlagos el. ellenállása	R_t	0, 1 - 10000	Ωm

3.1. táblázat. A véges elemes módszerrel előállított modell egyes részeinek fajlagos elektromos ellenállása és az elektródákból kilépő előjeles áramerősség. A gerjesztő áram erőssége minden esetben 100 mA!

Az elemek mérete tartományonként változtatható a tesztelések futtatásának optimalizálása érdekében. Természetesen a felosztásnak rendkívül finomnak kell lennie, ahol az elektromos tér gyorsan változik.

A véges elemek megengedett maximális mérete:

- $\bullet\,$ a szondatest belsejében $0,002~{\rm m},$
- $\bullet\,$ az elektródák felületén 0,001 m.

Az elemek maximális növekedési aránya:

- a fúrólyukban 1, 1-szeres,
- a belső modell hengernél 1,05-szörös.

A modellhenger külső tartományaiban a programcsomag alapbeállításának megfelelő normál felosztást használtam, mely egyre növekvő elemméretet eredményezett. Ott ugyanis az elektromos tér változása lassabb. A 3.3a ábra a belső és a teljes modell henger, valamint a fúrólyuk és a szondatest diszkrét felosztását érzékelteti. A 3.3b ábra pedig a mérőelektróda és a fúrólyuk finom felosztású rácsszerkezetét mutatja. Ez a rácsfelosztás mindösszesen 722 658 véges elemet eredményezett, d = 20cm átmérőjű fúrólyuk esetén.



3.2. ábra. A COMSOL Multiphysics programban készített teljes modell elképzelt, háromdimenziós perspektívája. Az ábrán feltüntetett értékek a koordináta-rendszer referenciapontjához képest vannak feltüntetve. A vertikális irányba mutató tengely eltolva látszik.



3.3. ábra. (a) A modelltartomány diszkretizálása nagy léptékben a belső modell hengernél. (b) Az elemek méretének finomfelosztása a mérőelektróda közelében.

3.2. Matematikai háttér

A továbblépéshez tisztázni kell, milyen matematikai problémát oldunk meg a program segítségével. Ehhez felírjuk az elektrodinamika felhasznált alapösszefüggéseit [21]:

1. Maxwell-egyenletrendszer:

$$\nabla \mathbf{D} = \rho, \tag{3.1}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},\tag{3.2}$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0, \tag{3.3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},\tag{3.4}$$

ahol **D** az elektromos eltolásvektor $\begin{bmatrix} \frac{As}{m^2} \end{bmatrix}$, ρ az elektromos töltéssűrűség $\begin{bmatrix} \frac{C}{m^3} \end{bmatrix}$, **E** az elektromos térerősségvektor $\begin{bmatrix} \frac{V}{m} \end{bmatrix}$, **B** a mágneses indukcióvektor $\begin{bmatrix} \frac{Vs}{m^2} = T \end{bmatrix}$, **H** a mágneses térerősségvektor $\begin{bmatrix} \frac{A}{m} \end{bmatrix}$, **j** a áramsűrűség-vektor $\begin{bmatrix} \frac{A}{m^2} \end{bmatrix}$ és t az idő [s].

2. Töltésmegmaradás törvénye:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \mathbf{j} = 0. \tag{3.5}$$

3. Általános Ohm-törvény:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \sigma (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_{\mathbf{k}}), \qquad (3.6)$$

ahol σ az elektromos vezetőképesség $\left[\frac{1}{\Omega m}\right]$, **v** egy **B** mágneses térben mozgó töltés sebessége. Az egyenlet első tagja a *konduktív*, a második a *Lorentz-féle mozgási indukció* következtében létrejövő áramsűrűség-vektor.

Tehát a tárgyalandó szonda véges elemes modellezése esetén ezeket az egyenleteket kell felírni, és egymásba ágyazottan megoldani, az alábbi egyszerűsítések mellett:

1. Mivel a szonda alacsony frekvenciájú váltakozó négyzetjelet ad ki, ezért stacionárius közelítéssel élünk:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0. \tag{3.7}$$

Minden örvénymentes vektortér felírható egy skalárpotenciál gradienseként:

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \tag{3.8}$$

ahol V az elektromos potenciál.

2. Elektromos szondázás esetén figyelmen kívül hagyhatjuk a *Lorentz-féle mozgási* indukció következtében létrejövő áramsűrűséget, tehát

$$\mathbf{j} = \sigma(-\nabla V). \tag{3.9}$$

 Stacionárius elektromos térben a töltéssűrűség divergenciája zérus a (3.5) egyenlet alapján:

$$\nabla \mathbf{j} = 0. \tag{3.10}$$

Az egyszerűsített (3.9) és (3.10) egyenleteket felhasználva kapjuk az elektromos potenciál eloszlását leíró differenciálegyenletet *(Laplace-egyenlet)*:

$$\nabla(\sigma\nabla V) = \nabla\left(\frac{1}{R}\nabla V\right) = 0, \qquad (3.11)$$

ahol R a közeg fajlagos elektromos ellenállása.

3.3. Határfeltételek, definíciók, paraméterek

A numerikus modellezés során a (3.11) egyenletet oldjuk meg a **COMSOL Multiphysics 4.2a** programcsomaggal. A megoldáshoz szükséges határfeltételek:

- 1. A téglalap alakú külső modellhenger földelt, V = 0 V.
- 2. Modellünket dipólusként képzeljük el, ahol egyetlen vonal alakú áramforrásként van definiálva a 2 darab védőelektróda és mérőelektróda (anód), míg a visszatérő elektróda egy pont alakú nyelő (katód). A (3.5) törvény értelmében a dipólus két pontjában lévő áramerősség-értékek előjeles összege zérus.
- 3. A szonda elektromosan szigetelő részeinél az áramsűrűség-vektor normális komponense zérus.



3.4. ábra. Áramvonalkép (fekete vonal) és potenciáleloszlás $R_m = 1 \ \Omega m$, $R_t = 10 \ \Omega m$ és d = 0, 2 m átmérőjű fúrólyuk esetén (a) a mérőműszer teljes hosszára, (b) a mérő és védőelektródák közelében.

A modellezés során mérjük:

- 1. Az elektródák felületén ki-, illetve belépő áramot, az áramsűrűség-vektorok integráljaként (I_0, I_u, I_d, I_B) .
- 2. A potenciálértékeket pedig egy-egy definiált pontban mérjük a mérő- (V_0) , mindkét védőelektróda közepén (V_u, V_d) , valamint a visszatérő pontelektródán (V_B) .

A program tehát a beállított határfeltételeknek megfelelően oldja meg a *Laplace-egyenletet* a diszkrét elemekre osztott modell egészére. Így megkapjuk a választott pontokban és felületeken érvényes feszültség és áramerősség értékeket.

4. Eredmények bemutatása

A 3.2. ábrán bemutatott geometriával rendelkező véges elemes modell tesztelését végeztem el alapvető geológia elrendezésekre [22]. A feladatok célja a szonda válaszjelének elemzése volt, előre definiált inhomogén közeg jelenlétében. Ezek segítségével kellett megállapítanom a szondamodell érzékenységét.

A 3.4 ábrán egy előzetes vizsgálat eredményét látjuk. A 3.4a ábrán a szonda teljes méretéhez, míg a 3.4b ábrán a szondatestre nagyítva láthatjuk az áramvonalképet és a potenciáleloszlást $R_m = 1 \ \Omega$ m-es fajlagos ellenállású fúróiszap, illetve $R_t = 10 \ \Omega$ m-es érintetlen zóna esetén. Ezeken az ábrákon z(m) – függőlegesen felfele irányított koordináta-rendszerben – a referenciaponttól mért távolságot, míg r(m) a forgástengelytől (azaz a mérőelektróda középpontjától) mért távolságot jelöli (3.1b ábra).

4.1. Látszólagos fajlagos elektromos ellenállásérték

Elektromos mérőeszközeinkkel közvetlenül nem tudjuk meghatározni a kőzetek fajlagos elektromos ellenállásának értékét (ld. 1.3.6. alfejezet). A (2.2) összefüggésből látható, hogy minden szondára jellemző egy K állandó, melyet szondakoefficiensnek neveznek. Meghatározása a következőképpen történt:

A véges kiterjedésű szondát tartalmazó, de egyébként homogén, ismert R_t fajlagos ellenállású közegben megmértem a mérőelektróda potenciálját, illetve a rajta kilépő áram nagyságát. A (2.2) egyenlet átrendezésével

$$K_{LL3} = R_t \frac{I_0}{V_0} = 0,14941 \text{ m}$$
 (4.1)

adódott, ahol K_{LL3} az adott háromelektródás fókuszált áramterű szondára jellemző, rögzített szondakoefficiens, R_t az érintetlen zóna fajlagos ellenállása, V_0 a mérőelektróda középpontjában mért potenciál és I_0 a mérőelektróda felületből kilépő áramerősség.

A geometriai koefficiens megállapítását $R_t = 0, 1; 1; 10; 100;$ és 1000 Ω m-es homogén közegek esetén is elvégeztem, a (4.1) egyenletben feltüntetett értéket 0,5%os pontosságon belül visszakaptam, így ezen értéket ($R_t = 1 \ \Omega$ m) fogadtam el véglegesnek.

4.2. A fúróiszap hatása

A 1.3.2. alfejezetben tárgyaltam a fúrólyuk és környezetének felépítését. A továbbiakban eltekintettem az **elárasztott** és az **átmeneti zóna** jelenlététől! Így azt feltételeztem, hogy a fúrólyukban lévő fúróiszapot tartalmazó közegen kívül csak az **érintetlen zóna** helyezkedik el.

Ideális esetben a szonda által meghatározott látszólagos fajlagos elektromos ellenállás értéke megegyezne a kőzet valós fajlagos ellenállásával $(R_a = R_t)$. Természetesen ez már a szonda geometriai elrendezése miatt sem valósulhat meg tetszőleges R_t esetén. Azonban az elektródák között létrejövő potenciálteret a fúróiszap is befolyásolja, attól függően, mekkora a lyuk átmérője és az iszap fajlagos ellenállása. A szakdolgozatban a fúróiszap fajlagos elektromos ellenállása mindig $R_m = 1 \ \Omega m$ volt (kivéve a pszeudogeometriai tényező számításánál). Ezért ebben a fejezetben az érintetlen zóna valós fajlagos elektromos ellenállásának, és a meghatározott látszólagos fajlagos elektromos ellenállásnak kapcsolatát vizsgáltam 4 különböző lyukátmérő esetén. A fúróiszapnak a mért látszólagos fajlagos elektromos ellenállásra gyakorolt hatása a 4.1 táblázatban látható. A 4.1a ábrán ezeket az adatokat logaritmikus skálán jelenítettem meg $R_t = 0, 1 - 10000 \ \Omega m$ és $d = 10 - 40 \ cm$ esetén. Az ellenállásértékeket R_m -mel normáltam. $R_t = 1 \ \Omega m$ esetén minden görbe egybeesik, $R_a = 1 \Omega m$, hiszen ennél a pontnál határoztam meg a K_{LL3} szondakoefficiens értékét. A látszólagos fajlagos elektromos ellenállásértékek $R_t < 1 \ \Omega m$ esetén nagyobbak, míg $R_t > 1 \ \Omega m$ mellett általában kisebbek R_t valós ellenállásnál.

A szonda átmérője 6, 3 cm, ezért 10 cm átmérőjű fúrólyukban a szonda csak "szorosan" fér el. A gyakorlatban az eszköz beszorulásának veszélye miatt ez ritkán fordul elő. A 4.1 táblázat alapján a látszólagos fajlagos elektromos ellenállásértékek legnagyobb eltérése az érintetlen zóna nagyon nagy, illetve nagyon kicsi fajlagos elektromos ellenállása esetén a legszembetűnőbb. Sőt, nagy lyukátmérőnél a fúróiszap jelenléte gyakorlatilag érzéketlenné teszi az eszközt.

A valós földtani környezet fajlagos ellenállás értéktartománya $R_t = 1 - 5000 \ \Omega m$ közé esik. A 4.2. táblázatban foglaltam össze a különböző lyukátmérőkhöz tartozó korrekciós értékeket $R_t = 10$; 100; 1000 Ωm esetén. A 4.2. ábrán ezek az eredmények (K_d) láthatóak a lyukátmérő függvényében. A korrekciós szorzó megállapítása a következőképpen történt:

$$K_d = \frac{R_t}{R_a},\tag{4.2}$$

$R_t \ [\Omega m]$	d [cm]					
	10	15	20	25	30	40
0, 1	0,21	0, 30	0, 36	0, 41	0,45	0,52
1	1	1	1	1	1	1
10	8,9	8, 2	7, 7	7,3	6, 9	6, 1
100	92	85	80	76	71	58
1000	986	916	865	816	741	563
10000	10480	9724	9170	8380	5630	890

4.1. táblázat. A látszólagos (R_a) és az érintetlen zóna valós fajlagos elektromos ellenállásértékei (R_t) , eltérő átmérőjű (d) fúrólyukak és $R_m = 1 \Omega m$ fúróiszap esetén.

	K_d	K_d	K_d
d [cm]	$R_t = 10 \; [\Omega \mathrm{m}]$	$R_t = 100 \; [\Omega \mathrm{m}]$	$R_t = 1000 \; [\Omega \mathrm{m}]$
10	1,12	1,08	1,01
15	1,21	1,17	1,09
20	1,30	${\bf 1,25}$	1 , 16
25	1,38	1, 32	1,23
30	1,45	1,40	1,35
40	1,63	1,71	2,57

4.2. táblázat. A 4.2 összefüggés segítségével megállapított korrekciós szorzók (K_d) eltérő lyukátmérő (d) esetén $R_m = 1 \ \Omega m$ mellett.

ahol K_d a lyukátmérő figyelembevételével megállapított korrekciós faktor, R_a már a rögzített K_{LL3} szondakoefficienssel korrigált látszólagos fajlagos elektromos ellenállás.

A kapott adatpontokra a Grapher program spline smoothing funkciójával illesztettem görbéket, mert nem találtam releváns matematikai összefüggést a különböző esetek között. Jól látszik azonban, hogy a vizsgált átmérőtartományban $R_t = 10$ és 100 Ω m-es érintetlen zóna esetén K_d értéke szinte lineárisan nő a lyukátmérő tágulásával. $R_t = 1000 \Omega$ m mellett ez a tendencia d = 30 cm-ig figyelhető meg. Ilyen elrendezésben, tágabb fúrólyuk esetén R_a értéket jóval nagyobb szorzófaktorral kell korrigálni. Tehát K_d magas fajlagos ellenállású érintetlen közeg esetén erősen függ a lyuk méretétől. Alacsonyabb fajlagos ellenállású közegben nem figyelhető meg ilyen ugrásszerű változás. $R_t = 0, 1 \Omega$ m-es fajlagos elektromos ellenállásértékre vonatkozó korrekciókat nem tüntettem fel a 4.2. ábrán, mivel ezek a természetben szinte soha nem fordulnak elő. Ilyen esetben R_a értéket $K_d < 1$ szorzófaktorral kellene korrigálni. Összességében megállapítható, hogy a fúróiszap hatását a lyukátmérő



4.1. ábra. (a) A számított látszólagos (R_a) és az érintetlen zóna fajlagos elektromos ellenállás értékek (R_t) közötti kapcsolat eltérő átmérőjű fúrólyuk esetén (d), logaritmikus skálán, $R_m = 1 \Omega$ m ellenállással normálva. (b) Az LL3- és egy LL7szondamodellre [23] vonatkozó számított R_a -k és R_t -k közötti kapcsolat d = 20 cm átmérőjű fúrólyuk esetén, logaritmikus skálán $R_m = 1 \Omega$ m esetén.



4.2. ábra. A 4.2. táblázatban található (K_d) korrekciós értékek különböző fúrólyukátmérők (d) esetén.

függvényében korrigálni kell, különösen nagy ellenálláskontraszt esetén.

A szakirodalomban a fúróiszap hatását érzékeltető görbéket, a gyakorlatban legtöbbször használt átmérőre, d = 20 cm-re közlik. A 4.1b ábrán a dolgozatban vizsgált LL3 és egy korábban hasonlóan modellezett mélyebb behatolású LL7 szondára vonatkozó R_a értékek láthatók R_t függvényében ($R_t = 0, 1-1000 \Omega$ m). A hételektródás laterolog szonda felépítése valamivel fejlettebb, mint a háromelektródás laterolog modellé, ezért áramtere jobban fókuszált. Ennek eredményeként az LL7-szonda adataiból számított látszólagos fajlagos ellenállás értékek jobban illeszkednek R_t -re, mint a jelen dolgozatban vizsgált eszközé. Azonban, a fejezet elején tárgyalt egyszerűsítő feltevéseknek megfelelően a d = 20 cm-es lyukátmérő esetén mindegyik eszköz jól használható. A 4.2. ábra alapján d = 20 cm esetén az LL3 szondára vonatkozó korrekciós értékek $K_d = 1, 16 - 1, 30$ -nak adódtak $R_t = 10 - 1000 \Omega$ m-es érintetlen zóna jelenlétében.

Az imént ismertetett értékek megbízhatóságát kívántam megvizsgálni a program lehetőségeinek megfelelően. Egyszerűbb modellfelépítéssel (belső modell henger nélkül), sűrűbb térhálósítással, illetve egy manuálisan beállítható hibatényező finomításával. Ezek a változtatások azonban R_a értékét csak a negyedik jegyben pontosították. Ez egy nyomós bizonyíték volt arra, hogy a szondamodell kielégítően működik, és pontosabb felosztás, számolás esetén is hasonló eredményekkel szolgál, mint alapesetben. Az ilyen mértékű eltérések a gyakorlati mélyfúrási geofizikában elhanyagolhatóak.

4.3. Réteghatár jelenléte

Az eltérő földtani környezetben kialakuló kőzetrétegek általában különböző fajlagos elektromos ellenállásértékkel bírnak. Az elektromos szondával mért feszültségértékekből következtethetünk a réteghatár pontos mélységére is. Egy fontos kérdés: hogyan változik a mért potenciál (a számított látszólagos fajlagos elektromos ellenállás) a réteg határánál, és milyen pontossággal tudjuk kijelölni magát a réteghatárt. Ebben a tesztelésben a fúrólyuk átmérőjét d = 20 cm-re rögzítettem.

A modellben két horizontálisan végtelen kiterjedésű réteg határát *Heaviside* $f \ddot{u} ggv \acute{e} ny$ segítségével definiáltam a következőképpen [24]:

$$H(x): \mathbf{R} \to \mathbf{R}; H(x) = \int_{-\infty}^{x} \delta(t) dt, \qquad (4.3)$$

ahol a függvény értéke infinitezimális úton a *Dirac-féle deltafüggvény* improprius integrálásával számolható.

A függvényt egy referencia-magasságértékhez (z) képest léptettem végig a szondamodell mellett, tehát nem a szonda pozícióját, hanem a rétegeket mozgattam. Így nem kellett minden mélységnél új rácsszerkezetet generálni a modellben. A réteghatár egy $R_t = 1000 \ \Omega m$ (felső réteg) és egy $R_t = 10 \ \Omega m$ (alsó réteg) réteget választ el egymástól. A programban ez a következőképpen történt:

$$R_t(z) = 10 + 990 \cdot flc \ln s(z_f + z, j), \tag{4.4}$$

ahol z_f a réteghatár változó pozíciója, j pedig a függvény átmeneti vastagságának a fele. A függvény átmenetét j = 10 cm-re állítottam, ami a szonda (elméleti) vertikális felbontóképességének nagyságrendjébe esik. Az így létrehozott horizontális réteghatár közelében az áramvonalak elrendeződését a 4.3a ábra mutatja, abban az esetben, amikor réteghatár 1,5 m-rel a mérőelektróda felett helyezkedik el. Jól látszik, hogy a két eltérő ellenállású réteg határánál az áramvonalak a rájuk jellemző törési törvénynek megfelelően viselkednek. Nagyobb fajlagos ellenállású közegben az áramvonalak beesési merőlegestől mért szöge lecsökken, kisebbnél pedig növekszik. A réteghatár azon okból nem tökéletesen egyenletes az ábrán, mivel a szondától távolodva a tér véges elemes felosztása fokozatosan durvul.

A 4.4. ábrán a mérőelektróda potenciáljából (V_0) és a rajta kifolyó áram erősségéből (I_0) számított látszólagos fajlagos elektromos ellenállásértékeket (R_a) tüntettem fel a mérőelektróda mélységének függvényében fél-logaritmikus skálán. A függvényt összesen 80 m hosszan léptettem végig 20 cm-es lépésközökkel, azonban a 4.4 ábrán ennek csak a releváns részét jelenítettem meg. Megfigyelhetjük a látszólagos fajlagos elektromos ellenállásértékek lefutását, illetve ellenőrizhetjük a szonda vertikális felbontóképességét.

Erthető, hogy fúróiszap nélkül a látszólagos ellenállás jobban követi a szaggatott vonallal jelzett valós R_t -t. Mindkét esetben tapasztalható, hogy az adott réteg elérésénél – körülbelül +/ – 85 cm-nél – a látszólagos fajlagos ellenállásérték kisebb álmaximumot vesz fel. Ez minden bizonnyal a szonda geometriai elrendezésének következménye, hiszen a 79 cm-es védőelektróda itt lép be/ki a rétegbe/ből. Az alacsony fajlagos elektromos ellenállású fúróiszappal ($R_m = 1 \ \Omega m$) teli fúrólyuk estén a nagyobb fajlagos ellenállású réteg hatása távolabb cseng le, mint nélküle.



4.3. ábra. Áramvonalkép (fehér) és valós fajlagos ellenállás horizontálisan végtelen kiterjedésű (a) réteghatár és (b) ágyazott réteg esetén. (a) A felső réteg fajlagos ellenállása 1000 Ω m, az alsóé 10 Ω m. (b) Az ágyazott réteg fajlagos ellenállása 10 Ω m, az ágyazó rétegé 1000 Ω m. Mindkét eset fúróiszap nélküli elrendezést ábrázol.



4.4. ábra. A mérőelektródán mért potenciálértékekből és kifolyó áramerősségből számított látszólagos fajlagos elektromos ellenállás (R_a) az elektróda mélységének függvényében horizontálisan végtelen kiterjedésű réteghatár mellett fúróiszappal töltött d = 20 cm-es fúrólyuk esetén (piros), illetve fúrólyuk nélkül (kék) fúrólyukban.

A 4.4. ábra alapján megállapítható, hogy a nagy fajlagos ellenállásérték az utolsó 10 m-en csaknem 400 Ω m-t esik. Ez a lassú lecsengés/felfutás indikátora lehet annak, amikor a szonda egy nagy ellenállású rétegben megteszi az első (vagy az utolsó) métereket. Ezen kívül, a réteghatártól körülbelül 1,5 m mélységben az alacsonyabb ellenállású rétegben van egy $R_a = 7,3 \Omega$ m álminumum, mely nagy távolságban $R_a = 7,7 \Omega$ m látszólagos fajlagos ellenállásértéket ér el. A fúróiszap nélküli esetben gyakorlatilag nem létezik hasonló álminimum.

A visszatérő elektróda, a védőelektróda és a fúróiszap jelenléte okozhat kisebb ingadozásokat R_a -ban, azonban ezek sem a réteghatár kijelölését, sem az R_t meghatározását nem befolyásolják, ha K_d -t figyelembe vesszük. Természetesen a fúróiszap hatása nagyobb átmérőjű fúrólyuk esetén erősödik (ld. 4.2. alfejezet).

4.4. Ágyazott réteg jelenléte

A mélyfúrási geofizikai egyik fontos feladata, hogy kijelölje a különböző vastagságú ágyazott rétegek határát. A háromréteges modellt két egymással szembe fordított *Heaviside-függvény* segítségével valósítottam meg. Tehát a modellben két horizontálisan végtelen kiterjedésű féltér közé definiáltam egy H vastagságú ágyazott réteget. Az $R_t(z)$ függvényt a (4.4) összefüggésnek megfelelően állítottam be (itt: $10 - 1000 - 10 \Omega$ m-es elrendezésnél):

$$R_t(z) = 10 + 990 \cdot \left(flc_1hs(z_f + z + \frac{H}{2}, j) - \left(flc_1hs(z_f + z - \frac{H}{2}, j) \right), \quad (4.5)$$

ahol z_f az ágyazott réteg középmélysége, H az ágyazott réteg vastagsága.

A tesztelést nagy, illetve kis fajlagos ellenállású horizontálisan végtelen kiterjedésű beágyazott rétegmodellre is elvégeztem, négy különböző rétegvastagság esetén. Az alapesetek a következők:

- 1. Az ágyazott réteg fajlagos ellenállása 1000 $\Omega m,$ míg az ágyazórétegé 10 $\Omega m.$
- 2. Az ágyazott réteg fajlagos ellenállása 10 Ω m, míg az ágyazórétegé 1000 Ω m.

A rétegvastagságot a szonda geometriai paraméterei alapján választottam meg. Tehát olyan méretet állítottam be, ami összemérhető:

1. a teljes mérőberendezés hosszával (H = 10 m),

- 2. a mérőelektróda (A_0) és a visszatérő elektróda (B) távolságával (H = 5 m),
- 3. egy védőelektróda hosszával (H = 1 m),
- 4. a mérőelektróda nagyságával (H = 0, 2 m).

Ezeket az eseteket külön teszteltem fúróiszap jelenlétében és hiányában. Tehát összesen 16 különböző elrendezést vizsgáltam. A 4.3b ábrán egy kis fajlagos ellenállású, horizontálisan végtelen kiterjedésű ágyazott rétegmodellben kialakuló áramvonalszerkezet látható. A belső réteg vastagsága 3,5 m, fajlagos ellenállása 10 Ω m, míg az ágyazó réteg fajlagos ellenállása 1000 Ω m. (A ábra kizárólag szemléltetés céljából készült.)

A nagyobb rétegvastagságú teszteket (H = 10; 5; 1 m) 90 m-es, míg a vékonyréteget (H = 0, 2 m) 15 m-es hosszon számítottam, azonban a következő ábrákon csak 30 m, illetve a 6 m-es szakaszt tüntettem fel, mert így részletesen látható a látszólagos fajlagos elektromos ellenállás változása. A fúrólyuk átmérőjét d = 20 cmre rögzítettem. A látszólagos fajlagos ellenállás görbék jó közelítéssel szimmetrikusak a réteghatár közepére. A kisebb aszimetria a szondageometria aszimetriájából fakad. A 4.3. alfejezetben tárgyaltaknak megfelelően, fúróiszappal kitöltött lyuk esetén, kis fajlagos ellenállású ágyazó rétegen áthaladva gyorsan, míg nagy fajlagos ellenállású közegből kilépve lassabban változik a feszültségtér (4.4a és b ábra). A megállapítás különösen a H = 10 és 5 m vastagságú ágyazott rétegre igaz. A legszembetűnőbb a 4.5. ábrán magától értetődően a fúróiszap csökkentő hatása, mely ismételten felhívja a figyelmet az utólagos korrekció fontosságára (K_d).

Fúróiszap nélküli esetben a jel alakja gyorsabban változik, ezért a réteghatár pontosabban kijelölhető. A réteghatár közelében földtani értelmezést nem zavaró álminimum és álmaximum értékek jelentkeznek. A védőelektróda nagyságával összemérhető (H = 1 m) vastagságú ágyazott réteg esetén azonban valamivel eltérő az R_a görbék alakja. Megfigyelhető, hogy a vékonyréteg határainak közelében a látszólagos fajlagos ellenállásértékek szintén elérnek egy álminimumot és álmaximumot, majd a görbék felfutása/lecsengése hosszabb úton következik be (az ágyazott réteg vastagságához képest). Tehát ahogy csökken a réteg vastagsága, annál bizonytalanabbul lehet kijelölni a határokat. Azonban ez a bizonytalanság H = 1 m-ig nem számottevő. A (4.2) összefüggéssel analógiában be lehet vezetni egy K_H korrekciós értékét, mely a különböző vastagságú ágyazott rétegek hatását korrigálja rögzített



4.5. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás görbék H = 10; 5; 1 m vastagságú beágyazott réteg esetén, a szonda referenciapontja a mérőelektróda felezőpontja. A rétegek fajlagos ellenállása: (a) $10 - 1000 - 10 \Omega \text{m}$; (b) $1000 - 10 - 1000 \Omega \text{m}$.



4.6. ábra. A 4.3. táblázatban található (K_H) korrekciós értékek különböző vastagságú (H) ágyazott rétegek esetén 10 – 1000 – 10 Ω m-es és 1000 – 10 – 1000 Ω m-es elrendezésben $R_m = 1 \Omega$ m-es fúróiszappal kitöltött lyukkal, illetve nélküle.

	$R_m = 1 \ [\Omega m]$	f. iszap nélkül		$R_m = 1 \ [\Omega m]$	f. iszap nélkül
H[m]	K_H	K_H	H[m]	K_H	K_H
∞	1,30	1	∞	1,16	1
10	1,33	1,02	10	1,14	0,99
5	1,27	0,95	5	1,30	1,02
1	0,85	0,73	1	1, 58	1,12

4.3. táblázat. A (4.2) összefüggéssel hasonlóan megállapított korrekciós szorzó (K_H) eltérő vastagságú ágyazott rétegek esetén ($H = \infty$; 10; 5; 1 m) d = 20 cm és $R_m = 1 \Omega$ m mellett, illetve fúrólyuk nélkül. A táblázat baloldali része a $10 - 1000 - 10 \Omega$ m-es, míg a jobboldali az $1000 - 10 - 1000 \Omega$ m-es elrendezésre vonatkozik.

(d = 20 cm) lyukátmérő és ellenállás kontrasztok esetén. Ezek a szorzófaktorok a 4.3. táblázatban láthatók. Értékük $K_H = 0, 73 - 1, 58$ között változik a különböző vastagságú ágyazott rétegek, és az eltérő elrendezések függvényében (4.6. ábra). Látszik, hogy az ágyazott réteg vastagságának csökkenésével nő az R_a értékek meghatározására vonatkozó bizonytalanság. A fúróiszap jelenléte eltolja a korrekciós értékeket, melyek így már nem 1-hez tartanak. Az adatpontokra *Grapher program spline smoothing* funkcióval illesztettem görbéket, mert nem találtam releváns matematikai törvényszerűségeket különböző esetekre vonatkozóan. Szaggatott vonallal jelöltem a korrekciós értékeket, amikor az ágyazott réteg vastagsága tart a végtelenhez (ld. 4.2. alfejezet). Tehát a K_H értékeknek a d = 20 cm-es fúrólyukátmérőhöz tartozó K_d -be kell tartaniuk:

- $K_H = 1,30; 1000 10 1000 \ \Omega m \ (4.6 \ \text{ábra, piros szaggatott vonal}),$
- $K_H = 1, 16; 10 1000 10 \ \Omega m \ (4.6 \ \text{ábra barna szaggatott vonal}).$

Fúróiszap nélküli esetben a rétegvastagság növekedésével a korrekciós szorzó $K_H =$ 1-hez tart (4.6. ábra, fekete szaggatott vonal), hiszen abban az esetben az R_a értékeket elég csak a K_{LL3} szondakoefficienssel korrigálni.

A 4.7a és b ábrán a mérőelektróda nagyságával összemérhető vastagságú ágyazott rétegre vonatkozó 15 m-es szelvény látható. Legjobb esetben is maximum két számítást végeztem el a H = 0, 2 m vastagságú közegben. Mivel az ágyazott réteg vastagsága rendkívül kicsi, ezért a programban definiált *Heaviside-függvény* átmenetét 1 cm-re állítottam (j = 0, 01 m), és a mérés mintavételezése 5 cm-ként történt. Fúróiszapot nem tartalmazó fúrólyuk esetén a jel alakja itt is gyorsabban változik, ezért a réteghatárt pontosabban ki lehet jelölni. Ez a megállapítás különösen a kis



4.7. ábra. Látszólagos fajlagos ellenállás görbék H = 0, 2 m vastagságú beágyazott réteg esetén, $R_m = 1$ Ω m-es fúróiszappal, és nélküle. A rétegek fajlagos ellenállása:(a),(c) 10 - 1000 - 10 Ω m; (b),(d) 1000 - 10 - 1000 Ω m. A szonda referenciapontja a mérőelektróda felezőpontja.

fajlagos ellenállású ágyazott réteg esetében helytálló (4.7b és d ábra). A réteghatár közelében szintén azonosíthatóak kisebb álminimum és álmaximum értékek, melyek a valóságban nem relevánsak. A 4.7c és d ábrát nézve megállapíthatjuk, hogy a réteghatár kijelölésének pontossága ilyen esetben már összemérhető a vékonyréteg vastagságával. A 4.7a ábrán a referenciaponttól mért z = -5,35 m mélységben egy kisebb zökkenés látható az R_a értékekben. Ez a néhány tized Ω m-es változás annak következménye, hogy a visszatérő elektróda az ágyazott rétegbe jut. A 4.7b és d ábrán lévő $R_a = 1100 \ \Omega$ m-es álamximum értékeket 80 – 80 cm hosszan veszi fel a görbe. Ezek megegyeznek egy-egy védőelektróda hosszával. Ilyen vékony rétegnél a fúróiszap hatása olyannyira befolyásolja a számított R_a értékeket, hogy a kapott értékek pontossága számszerűen értelmezhetetlen. Ezért itt nem állapítottam meg a K_H értékeket. Tehát ilyen extrém vékonynak tekinthető réteg esetén a réteg mélysége még meghatározható, ugyanakkor ellenállását legfeljebb csak becsülhetjük.

A háromréteges teszteléseket elvégezve megállapítható, hogy a réteghatárok kijelölésének pontossága a szonda (elméleti) vertikális felbontóképességével arányos. A réteg vastagságának csökkenésével egyre bizonytalanabbul tudjuk kijelölni a réteghatárokat, viszont ezt a tevékenységet a szonda geometriai viszonyainak tudatában kielégítő pontossággal tudjuk végezni. Azonban d = 20 cm átmérőjű $R_m = 1 \Omega m$ fajlagos ellenállású fúróiszappal teli lyuk esetén a rétegek vastagságának növekedésével a K_H -k felveszik a megfelelő K_d értékeket. Tehát a 4.2. alfejezetben megállapított és az itteni korrekciós értékek – az elvártnak megfelelően – összefüggenek. Nagy ellenálláskontraszt esetén szűk rétegnél (H = 0, 2 m) is ki tudjuk jelölni a réteghatárokat, azonban a látszólagos fajlagos ellenállásértékek csak iránymutatóak.

4.5. A szonda radiális érzékenysége

A háromelektródás fókuszált áramterű szondamodell vertikális felbontóképességét az előző két alfejezetben külön tárgyaltam. Az oldalirányú behatolóképesség vizsgálatát két egyszerű radiálisan inhomogén modellen végeztem, ahol a radiális inhomogenitást a fúróiszappal teli fúrólyuk és az érintetlen zóna képviselte. A 4.8a és b ábra az elektromos potenciáltér, illetve a kialakuló áramvonalkép szerkezetét mutatja két esetben: (a) a fúróiszap fajlagos ellenállása $R_m = 1 \Omega m$, az érintetlen zónáé $R_t = 10 \Omega m$, illetve (b) mikor $R_m = 10 \Omega m$ és $R_t = 1 \Omega m$. Mind a két ábrán látszik, hogy az áramvonalak törést szenvednek a különböző fajlagos ellenállású réteg



4.8. ábra. Radiálisan kétrétegű modell potenciáleloszlása és áramvonal szerkezete (fekete), d = 60 cm. (a) A fúróiszap fajlagos ellenállása $R_m = 1$ Ω m, az érintetlen zóna fajlagos ellenállása $R_t = 10$ Ω m. (b) $R_m = 10$ Ω m és $R_t = 1$ Ω m.

határán. Magától értetődően, a két környezeti modellben a potenciáltér is más eloszlású.

Az előzőekben leírtak alapján megállapíthatjuk, hogy R_a értékét R_m , R_t és d közösen határozzák meg. Ezen értékek között teremt kapcsolatot a **pszeudogeometriai tényező** (J(d)):

$$R_a = R_m J(d) + R_t [1 - J(d)].$$
(4.6)

Tehát a pszeudogeometriai tényező megmutatja, hogy a meghatározott látszólagos fajlagos elektromos ellenállásértékben mekkora súllyal szerepel a fúrólyukban lévő iszap fajlagos elektromos ellenállása [13]. Ezért nagyobb átmérőjű fúrólyuk esetén J értéke növekszik. A 4.9a és b ábrán a látszólagos fajlagos elektromos ellenállásértékek és a pszeudogeometriai tényező a fúrólyuk átmérőjének függvényében látható két különböző elrendezés esetén. A lyuk bőségét a szondatest falától egészen 5 m-ig

d [cm]	$R_a [\Omega m]$	$J_{I.}(d)$	$R_a [\Omega m]$	$J_{II.}(d)$
8	9,40	0,07	1,61	0,07
10	8,96	0, 12	2,11	0, 12
15	8,20	0, 20	2,99	0,22
20	7,68	0, 26	3,63	0, 29
25	7,23	0, 31	4,11	0,35
30	6,88	0,35	4,53	0, 39
40	6,14	0, 43	5,18	0,46
50	5,40	0, 51	5,67	0,52

4.4. táblázat. A (4.6) összefüggés alapján számított pszeudogeometriai tényező értékek kétfajta radiálisan inhomogén közegmodell esetén: I $R_m = 1 \ \Omega m$, $R_t = 10 \ \Omega m$; II $R_m = 10 \ \Omega m$, $R_t = 1 \ \Omega m$. A táblázat csak a valóságban is releváns értékeket tartalmazza.



4.9. ábra. (a) Látszólagos fajlagos ellenállás görbe (R_a) és (b) a pszeudogeometriai tényező (J) radiálisan inhomogén két rétegből álló modellre a fúrólyuk átmérőjének (d) függvényében. Az első esetben $R_m = 1 \ \Omega m$ és $R_t = 10 \ \Omega m$ (piros), a másikban $R_m = 10 \ \Omega m$ és $R_t = 1 \ \Omega m$ (kék).

növeltem, a szonda elvárt válaszjeleinek megfelelően. A 4.4. táblázatban azokat az R_a és J értékeket gyűjtöttem össze, melyek a gyakorlati mélyfúrási geofizikában relevánsak.

Altalános jellemzésként a 4.9a ábra alapján elmondható, hogy ha a fúróiszap fajlagos ellenállása nagyobb, mint az érintetlen zónáé $(R_m > R_t)$, akkor a fúrólyuk átmérőjének növelésével R_a lassabban tart R_m -hez, mint ellenkező esetben $(R_m <$ R_t). Ez a karakterisztika teljesen érthető, hiszen a kisebb ellenállású közeli fúróiszapban "szívesebben" folyik el az áram annál, mintha a távoli réteg ellenállása lenne kisebb. Ennek a megállapításának megfelelően, a 4.9b ábrán a pszeudogeometriai tényező is lassabban tart 1-hez $(R_m > R_t)$. A 4.2. alfejezetben tett kvalitatív megállapítás mellett, most a szakirodalomban leírtaknak megfelelően határoztam meg a szondamodell maximális oldalirányú behatolóképességét. Abban az esetben, amikor a fúrólyuk átmérője nem haladja meg a fél métert, nincs érdemi különbség a két különböző eset között. A valóságban ez a legtöbbször így van. Tehát a fúróiszappal teli fúrólyuk átmérőjének növelésével nő a számított R_a bizonytalansága, így nő J értéke is. A 4.4. táblázat és 4.9a és b ábra alapján: d = 20 cm lyukátmérőnél a szondamodell 71 - 74% pontossággal adja vissza az érintetlen zóna fajlagos ellenállását. Azonban d = 50 cm-es fúrólyuk esetén a fúróiszap már annyira ,,
elvakítja" a mérőberendezést, hogy R_a már csak
 49-48% pontossággal adja vissza R_t értékét.

4.6. A szonda érzékenysége komplex elméleti elrendezésnél

Ebben a részben egy bonyolultabb és egyben valósághűbb modellelrendezés során szeretném szemléltetni a szondamodellre jellemző általános felbontóképesség határait. Tulajdonképpen a vizsgált elrendezés felfogható a 4.4. és a 4.5. alfejezetek kombinációjaként. Egy előre definiált vastagságú és R_t fajlagos ellenállású ágyazott rétegnél vizsgáltam a számított R_a értékeket különböző átmérőjű fúrólyukak esetén. Az előzőekben leírtakkal megegyezően állítottam be az ágyazott és az ágyazóréteg fajlagos ellenállását. A fúrólyuk mindegyik esetben $R_m = 1 \ \Omega m$ fajlagos ellenállású fúróiszapot tartalmazott. Általánosságban azt szeretném megmutatni, hogy a szonda vertikális felbontóképessége és radiális érzékenysége valós esetekben nem tárgyalható egymástól teljesen függetlenül.

A 4.10a és b ábra egy H = 1 m vastagságú nagy, illetve kis fajlagos ellenállású

ágyazott réteg jelenlétében mért R_a , "szelvényeket" mutatja. A 4.10a és b ábrán érdekes kettősség látható. A 10 – 1000 – 10 Ω m-es elrendezésben a réteghatárt meglehetősen pontosan ki lehet jelölni, azonban az ágyazott réteg látszólagos fajlagos ellenállása egyre csökken a lyukátmérő növelésével. Ez azzal magyarázható, hogy az áramvonalak inkább a kedvezőbb vezetőképességű fúróiszapban terjednek. Így a lyuk méretének növelésével a szondamodell egyre érzéketlenebbé válik az ágyazott közeg ellenállására.

Ezzel szemben az 1000 – 10 – 1000 Ω m-es modellnél R_a értéke jól visszaadja a valós ellenállást, míg a réteghatár kijelölésének bizonytalansága d bővülésével nő. Ebben az elrendezésben a fúróiszap jelenléte segíti a szonda működését, legalábbis a valós ellenállás érték meghatározásában. A 4.5 táblázat ezen látszólagos fajlagos elektromos ellenállás értékeket mutatja z = 0-ban, vagyis a réteg közepén. Látható, hogy d = 20 cm, valamint H = 1 m mellett nagy fajlagos ellenállású ágyazott réteg esetén R_a 63%, míg kis fajlagos ellenállású ágyazott réteg jelenlétében R_a 18% pontossággal adja vissza R_t -t. (A táblázatban csak a valóságban is releváns lyukátmérőkhöz tartozó értékeket tüntettem fel.) A 4.11a és b ábrán ezeket az R_a értékeket ábrázoltam d függvényében. Itt külön nem számoltam pszeudogeometria tényezőt az eltérő modellekre, hiszen a (4.6) egyszerű összefüggés nem érvényes. A (4.2) összefüggéssel analógiában be lehet vezetni egy K_c korrekciós értékét, mely H = 1 m vastagságú ágyazott réteg valós fajlagos ellenállásához igazítja R_a értékét különböző d átmérőjű fúrólyukak esetén. A 4.5. táblázatban ezek a szorzófaktorok szintén megtalálhatóak.

A 4.12. ábra K_c változását mutatja d függvényében. Ertékük $K_c = 0,77 - 11,8$ között változik d = 8 - 40 cm-re. Látszik, hogy tágabb fúrólyukhoz nagyobb K_c érték tartozik. Különösen abban az esetben kiugró ez az érték, amikor az ágyazott réteg nagy fajlagos ellenállással bír. Az adatpontokra *Grapher program spline smoothing* funkcióval illesztettem görbét, mert nem találtam releváns összefüggéseket a különböző esetekre vonatkozóan. K_c értékek d = 20 cm átmérőjű fúrólyuknál, visszaadják a 4.4. alfejezetben bevezetett K_H értékeket. Tehát ezek a korrekciós szorzók – a megfelelő beállítások mellett – összhangban vannak.

A 4.10c és d ábrán az előző bekezdésben taglaltak érvényben maradnak H = 0, 2 m vastagságú ágyazott réteg esetén is. A réteg vékonysága azonban erősen befolyásolja a számított R_a értékeket. A réteghatárok helyzetének megállapíthatósága $10 - 1000 - 10 \Omega$ m-es elrendezésnél jó, viszont $1000 - 10 - 1000 \Omega$ m-nél megle-

d [cm]	$R_a \Omega m$	K_{korr}	d [cm]	$R_a \Omega m$	K_{korr}
8	826	1,21	8	13,1	0,77
10	778	1,29	10	12,7	0,79
15	694	1,44	15	12,1	0,82
20	631	1,58	20	11, 8	0, 85
25	527	1,89	25	14, 5	0,84
30	330	3,03	30	11,5	0,87
40	84,6	11,8	40	11,3	0,89
50	30,7	32, 6	50	10,3	0, 97

4.5. táblázat. Különböző lyukátmérők esetén számított R_a és K_{korr} értékek d = 8 - 50 cm átmérőjű fúrólyuk esetén. A táblázat baloldali 10 - 1000 - 10 Ω m, míg jobboldali része 1000 - 10 - 1000 Ω m modellelrendezésre vonatkozik, $R_m = 1 \Omega$ m és H = 1 m esetén.

hetősen pontatlan. A 4.11b ábrán látható, hogy d = 8 - 50 cm között, R_a értéke nő, majd csökken. Tehát az alacsony fajlagos ellenállású vékonyréteg mind kevésbé érzékelhető. Viszont d = 50 cm felett a fúróiszap hatása kezd dominálni. H =0, 2 m vastagságú rétegnél, mindegyik elrendezésben a fúróiszap hatása olyannyira befolyásolja a számított R_a -t, hogy a kapott értékek pontossága számszerűen értelmezhetetlen. Ezért H = 0, 2 m-es elrendezésben nem állapítottam meg korrekciós szorzófaktort (K_c).

Ezek alapján belátható, hogy a háromelektródás fókuszált áramterű szonda érzékenységére jellemző elméleti értékek szélsőséges esetekben csak iránymutató jellegűek. A szonda vertikális felbontó- és radiális behatolóképessége a közegmodell bonyolultságától függően változik. Vagyis minél nagyobb a fúróiszappal teli fúrólyuk mérete, általában annál pontatlanabbul tudjuk meghatározni az ágyazott réteg fajlagos ellenállását és határait (az elrendezéstől függően). A megfelelő helyeken K_d , K_H és K_c értékek összevágnak, tehát a szondamodell működésének tesztelését alapvető geológiai elrendezéseknél sikerült megfelelően elvégeznem.



4.10. ábra. A számított R_a értékek eltérő átmérőjű fúrólyuk esetén, ahol $R_m = 1 \Omega m$. Az ágyazott rétegek vastagsága: H = 1 m (a), (b,) és H = 0, 2 m (c), (d); (a), (c) 10 $\Omega m - 1000 \Omega m - 10 \Omega m$; (b), (d)1000 $\Omega m - 10 \Omega m - 1000 \Omega m$.



4.11. ábra. A számított R_a értékek a fúrólyuk átmérőjének (d) függvényében a mérőelektróda magasságában. (a) $10 - 1000 - 10 \Omega m$ és (b) $1000 - 10 - 1000 \Omega m$ modellelrendezés esetén, H = 1 m (kék) és H = 0, 2 m (piros) vastagságú ágyazott rétegre.



4.12. ábra. A 4.2 összefüggéssel analógiában számított K_c értékek változó átmérőjű (d) fúrólyuk esetén H = 1 m vastagságú ágyazott rétegre: $10 - 1000 - 10 \ \Omega m$ (barna) és $1000 - 10 - 1000 \ \Omega m$ (piros) modellelrendezés esetén.

Sorsz.	Felső [m]	Alsó [m]	H [m]	Főbb litológiai alkotók	$R_t \; [\Omega \mathrm{m}]$
1	1965	1966	1	Homokkő, üledék	100
2	1966	2237	271	Mészkő, márgás agyag	150
3	2237	2349	112	Agyagkő, mészkő,	100
4	2349	2576	227	Agyagkő, homokkő	60 - 80
5	2576	2905	329	Meszes agyagkő, homokkő	100
6	2905	2932	27	Agyagkő	30
7	2932	2980	48	Halit	2000
8	2980	2994	14	Anhidrit, agyag	20
9	2294	3051	51	Halit	2000
10	3051	3059	8	Anhidrit, szürke agyag	2000
11	3059	3297	238	Halit	2000
12	3297	3303	6	Anhidrit	2000
13	3303	3307	4	Dolomit	40 - 150
14	3307	3349	42	Anhidrit	2000
15	3349	3370	21	Halit	2000
16	3370	3518	148	Anhidrit	2000
17	3518	3519	1	Mészkő	40 - 150
18	3519	3520	1	Pala	5
19	3520	3652	132	Homokkő	10 - 30

4.6. táblázat. Egy délnyugat-lengyelországi előszudéta monoklinális szerkezetű valós szelvényre vonatkozó rétegek vastagsága (H), azok elhelyezkedése, főbb litológiai alkotóik, valamint a rájuk jellemző fajlagos ellenállás értékek [23].

4.7. A szonda viselkedése valós szelvény alapján készített modellelrendezésben

Az előző alfejezetekben ismertettem a szóba jöhető elméleti elrendezéseknél elvégzett vizsgálatokhoz tartozó eredményeket és következtetéseket. Végül egy eredeti, Délnyugat-Lengyelországban létesített fúrólyukban készült (előszudéta monoklinális szerkezetű) ellenállásszelvény alapján készítettem ideális numerikus közegmodellt 1665 és 3650 m mélységben. Az eltérő vezetőképességű rétegösszletet az előzőekben leírtaknak megfelelően definiáltam. A különböző rétegek sorszáma, elhelyezkedése (teteje és alja a lefelé mutató koordináta-rendszerben), vastagsága, litológiai összetétele és R_t valós fajlagos ellenállásértéket is közöltek, ott a modellezés során a kettő számtani közepével számoltam. Magát a szelvényhez tartozó adatokat és a hozzá tartozó hételektródás szondával mért R_a értékeket egy másik tanulmányból vettem [23].

A 4.13a és b ábrán a valós rétegek R_t fajlagos ellenállása, illetve a háromelektródás és a hételektródás laterologra számított R_a látható a valós függvényében d = 0, 2 m átmérőjű fúrólyuk és $R_m = 1 \ \Omega$ m estén. Az előző fejezetekben tárgyaltaknak megfelelően:

- a réteghatárok H = 1 m vastagság esetén is jól kijelölhetőek,
- az R_a értékek a 4.4. és 4.6. alfejezetben bevezetett K_H és K_c értékek figyelembe vételével visszaadják az adott rétegre jellemző R_t értéket.

Az itteni R_a görbék segítségével is tudtam igazolni a 4.2. alfejezetben tett állítást: a háromelektródás szondamodell sokkal érzékenyebb a fúrólyukban lévő iszap R_m ellenállásra, mint a hételektródás modell. Ugyanis az utóbbinál a mérőelektródák pászmája jobban fókuszált, így annak nagyobb az oldalirányú behatolóképessége. A háromelektródás szondamodell az előzetes teszteléseknek megfelelően viselkedett a valós szelvény alapján készített összetett közegmodell esetén. Ugyanakkor az LL3 szonda mind vertikális felbontásával, mind radiális behatolóképességével felülmúlja a hagyományos, nem fókuszált áramterű elektromos szondák képességeit. Továbbá egyszerűbb elektronikája, valamint jóval alacsonyabb bekerülési költsége életképessé teszi a bonyolultabb LL7 és LL9 szondatípusok mellett. Sőt, a kis mélységű szelvényezés esetén a mai napig domináns szondatípus.

Érdemes megemlíteni, hogy 3500 és 3550 m között a hételektródás elrendezés R_a görbéje érdekes alakot vesz fel. Nagy ellenállású rétegből kilépve a mért R_a körülbelül 25 m hosszan tart a kisebb ellenállású réteg R_t fajlagos ellenállásához. Ezt *Groningen-effektusnak* hívjuk. Nagy fajlagos ellenállású rétegeknél a visszatérő áramtér jórészt a fúrólyukra koncentrálódik, mely erőteljesen befolyásolja a referencia elektróda potenciálját [25], [26]. Ez a jelenség a háromelektródás laterolog esetén nem figyelhető meg az elektródák eltérő elrendezése miatt.



4.13. ábra. Délnyugat-Lengyelországban felvett előszudéta monoklinális szerkezetű ellenállásszelvény interpretálása a szondamodellre. A 4.6 táblázatban közölt rétegekre vonatkozó R_t (fekete), a három- (piros) és a hételektródás (kék) szondamodellel mért R_a értékek valós z(m) mélység függvényében, $R_m = 1 \ \Omega m$ és $d = 20 \ cm$ estén.

5. Összegzés

Dolgozatom elején általánosan ismertettem a mélyfúrási geofizikában használt elektromos szondák struktúráját, a három elektródás fókuszált áramterű *laterolog– elvet* és annak első gyakorlati megvalósítását. Bemutattam a szonda eredeti terveit, majd interpretációját axiszimmetrikus (r,z) síkú koordináta-rendszerben. A gyakorlatban használt LL3 szonda vizsgálatát egy véges elemes numerikus programcsomag, a **COMSOL Multiphysics 4.2a** használatával végeztem el.

Először egyszerűbb modellelrendezés esetén vizsgáltam a fúróiszappal teli fúrólyuk hatását a mérhető látszólagos fajlagos elektromos ellenállásra, R_a -ra. Itt bevezettem egy K_d szorzófaktort, mely a mért látszólagos fajlagos elektromos ellenállás értékeket korrigálja a fúrólyuk átmérőjének függvényében (d = 10 - 40 cm). Ezen kívül összehasonlítottam a háromelektródás és egy hételektródás szondamodellnél számított R_a görbéket. Így kvalitatívan bebizonyítottam, hogy az LL7 szondamodell mérőelektródáinak áramtere jobban fókuszált, mint az LL3 mérőműszeré.

Ezek után *Haeviside-függvény* segítségével horizontálisan végtelen kiterjedésű két félvégtelen közeg határát definiáltam, és vizsgáltam a mérőelektródán mért feszültség- és áramerősség-értékekből számított R_a görbék alakját. A szondamodell segítésével a réteghatár pozícióját megfelelő pontossággal meg tudtam határozni d = 20 cm estén. A görbéken tapasztalt látszólagos, de a földtani értelmezést nem zavaró változások okát feltártam.

A következőkben a szondával mért R_a értékeket és az ábrázolt görbék lefutását vizsgáltam H = 10; 5; 1 és 0, 2 m vastagságú ágyazott rétegre, d = 20 cm lyukátmérő estén 10 – 1000 – 10 Ω m és 1000 – 10 – 1000 Ω m modellelrendezésre. Az első három esetben bevezettem egy K_H , rétegvastagságtól függő korrekciós szorzót. Ezek az értékek – megfelelő lyukátmérő estén – adott ágyazott közeg vastagságának növelésével K_d értékekbe tartanak. Ez egy nyomós bizonyíték volt arra, hogy a modell megfelelően működik.

Ezt követően teszteltem a szondamodell radiális behatolóképességét. A pszeudogeometriai tényező megmutatja, hogy a számított R_a értékekben mekkora súllyal szerepel a fúróiszap R_m fajlagos elektromos ellenállása, adott lyukátmérőre vonatkoztatva. A szondamodell d = 20 cm lyukbőség esetén 71 – 74% pontossággal adja vissza R_t értékét.



5.1. ábra. Az eredeti háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda képe a főbb részekkel.

Ezek után H = 1 és 0,2 m vastagságú ágyazott réteg jelenlétében, $10 - 1000 - 10 \Omega m$ és $1000 - 10 - 1000 \Omega m$ modellelrendezésekre vizsgáltam a szonda érzékenységét változó lyukátmérő esetén. Az első esetben egy K_c korrekciós faktor segítségével vettem figyelembe az R_a és a valós R_t értékek közti különbséget. K_c és K_H szorzók d = 20 cm-nél megegyeznek. Az iparban változó átmérőjű fúrólyuk és vastagságú rétegek hatását egyszerre veszik figyelembe, és az eredményt egy többdimenziós, korrekciós felületen ábrázolják.

Végül egy valós, földtani szelvényről készített ellenállásprofilon vizsgáltam a szonda működését. A szondamodell az előzetes teszteléseknek megfelelően adta vissza R_a értékeket és a réteghatárok kijelölésének pontosságát. Ezen kívül az LL3 szonda R_a görbéjét összehasonlítottam – a korábban említett – LL7 szondáéval.

A háromelektródás szondamodell egy valós mérőberendezés tervrajza alapján készült, ami a Geo-Log Kft. tulajdona. Az eredeti műszer fényképe a 5.1. ábrán látható. A gyakorlatban a szondakoefficiens (K) értékét külön nem adják meg. Ismert ellenállás-szelvényű tesztkutakban egy etalonhoz képest próbálnak megállapítani egyetlen komplex korrekciós szorzót. Tapasztalataik alapján a szondamodellhez tartozó szondakoefficiens és a valódi műszernél használatos korrekciós érték nem egyezik. Ennek az eltérésnek a magyarázata egy következő feladat lehet.

Hivatkozások

- Kis, K., Altalános geofizikai alapismeretek, ELTE, Eötvös Kiadó, Budapest, 2007, pp. 420
- [2] Lipovics, T., Dövényi, P., A geofizika szerepe a környezettudományban, geophysics.elte.hu/Geofizikakornyezettud.pdf, pp. 31
- [3] Telford, W.M., Geldart, L.P., Applied Geophysics, Cambridge University Press, Cambridge, 2004, pp. 744
- [4] Balázs, L., Mélyfúrási geofizika, egyetemi jegyzet, ELTE, Budapest, 2013, elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/geofizika/book.pdf, pp. 147
- [5] Schlumberger Log Interpretation Charts, Schlumberger Drive, Texas, 2009, pp. 293
- [6] Balázs, L., Kőzetfizika, egyetemi jegyzet, ELTE, Budapest, 2013, elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/kozetfizika/book.pdf, pp. 111
- Schlumberger Log Interpretation Principles/Applications, Schlumberger Wireline, Testing, Texas, 1998, pp. 226
- [8] Archie, G.E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Petroleum Transactions of AIME, 146/1, 54–62, 1942
- [9] Komlósi, Zs., A mélyfúrási geofizika alapjai, lehetőségei és korlátai, Nagyalföldi Kőolaj- és Földgáztermelő Vállalat Nyomda Üzem, Budapest, 1987, pp. 252
- [10] Darwin, V.E, Singer, J.M., Well Logging for Earth Scientists, Dordrecht, 2008, pp. 692
- [11] de Witte, L., *Electric Logging-Resistivity Logging in Thin Beds*, Petroleum Transaction of AIME abstract, 1951
- [12] Doll, H.G., Logging-The Laterolog: A New Resistivity Logging Method with Electrodes Using an Automatic Focusing System Petroleum Transaction of AIME abstract, 1955

- [13] Serra, O., Fundamentals of well-log interpretation., Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1988, pp. 423
- [14] Owen, J.E., Walton, J.G., The guard electrode logging system, Petroleum Transactions of AIME, 347-356, 1951
- [15] Drahos, D., Electrical modeling of the inhomogeneous invaded zone, Society of Exploration Geophysicists, 49/10, 1580-1585, 1984
- [16] Balázs, L., Penetrációs elektromos szonda modellezése, Geophysival Transactions, 45/1, 19-36, 2005
- [17] Balázs, L., Analytic approximation of Green-function of well logging electric direct problem for the case of continuous radial resistivity profile, Acta Geodaetica et Geophysica, 42, 309-322, 2007
- [18] Zienkiewicz, O.C., The coupling of the finite element method and boundary solution procedures, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 11, 355-375, 1977
- [19] Zimmerman, W.B.J., Multiphysics modeling with finite element methods, World Scientific Publishing Company, Singapore, 2006
- [20] Tatsien, L., Yongji, T., Yuejun, P., Mathematical model and method for spontaneous potential well-logging, European Journal of Applied Mathematics, 5/2, 123-139, 1994
- [21] Jackson, J.D, Klasszikus elektrodinamika, Typotex, Budapest, 2004, pp. 887
- [22] Drahos, D., Galsa. A., Penetrációs elektromos szonda modellezése véges elemes numerikus módszerrel, Magyar Geofizika, 44/1, 22-30, 2007
- [23] Jaryzna, J.A., Cichy, A., Drahos, D., Galsa, A., New methods for modelling laterolog resistivity corrections, Acta Geophysica, 2015 elfogadva
- [24] Bronstejn, I.N., Szemengyajev, K.A., Matematikai kézikönyv, Typotex, Budapest, 2004, pp. 1209

- [25] Nam M.J., Pardo D., Torres-Verdin C., Assessment of Delaware and Groningen effects on dual-laterolog measurements with a self-adaptive hp finite-element method, Geophysics, 75, 6, F143-149, 2010
- [26] Drahos, D., Galsa, A., Modelling Groningen effect on deep laterolog, Geosiences and Engineering, 2015, elbírálás alatt

NYILATKOZAT

Név: Szijártó Márk

ELTE Természettudományi Kar, szak: fizika BSc.

NEPTUN azonosító: ESR61M

Szakdolgozat címe: Háromelektródás, fókuszált áramterű elektromos szonda modellezése véges elemes módszerrel

A **szakdolgozat** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló munkám eredménye, saját szellemi termékem, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2015. május 22.

a hallgató aláírása