

Mélyfúrási gamma-szelvények felbontásának javítása dekonvolúcióval, Monte Carlo modellezés alapján

TDK dolgozat

Készítette: Kemény Márton István,

Téczely Zoltán

Témavezető: Dr. Balázs László



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport

Budapest, 2011

Tartalom

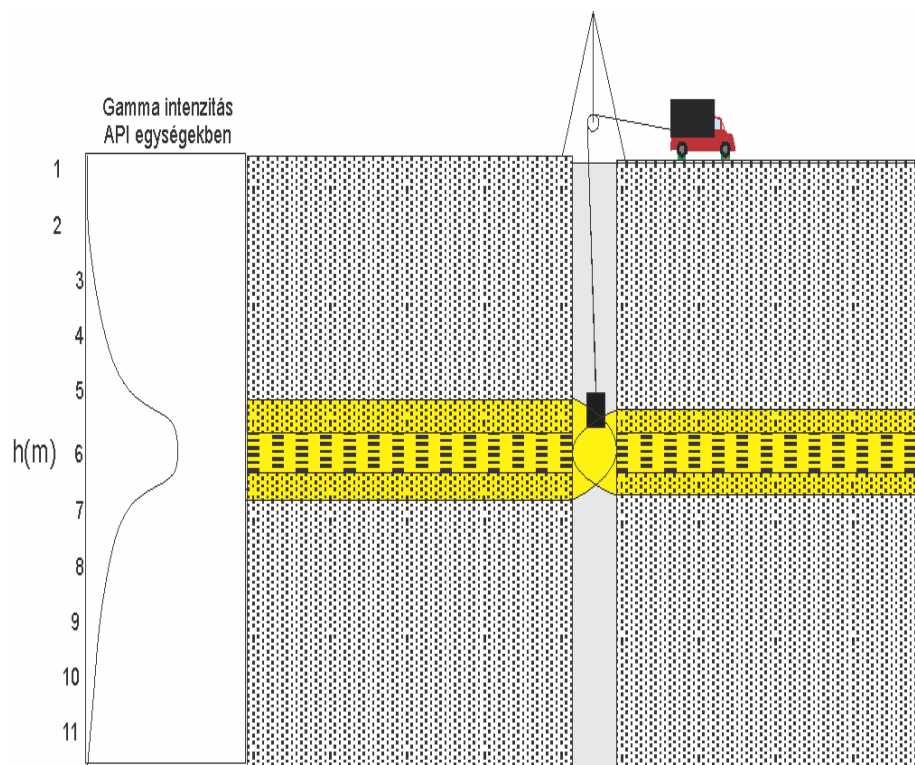
1. Általános bevezető.....	3
1.1 A kutatómunka célja.....	3
1.2 A kettős feladat.....	5
2. Természetes gamma-mérések a gyakorlatban.....	6
2.1 A mélyfúrási technológia szerepe a gamma-mérésekben.....	6
2.2 Természetes gamma-mérések technológiája	8
2.3 Radioaktivitás és agyag.....	9
2.4. A gamma-mérések jelentősége a szénhidrogén-kutatásban.....	12
3. A modellezés.....	15
3. 1. A Monte-Carlo módszerek.....	15
3.2 Az MCNP program.....	17
3.2.1. Nukleáris adatok és reakciók könyvtárai	18
3.2.2. Forrás meghatározás	18
3.2.3. Tallyk és outputok	19
3.2.4. Hibabecslés	19
3.2.5. Szórás csökkentés.....	20
3.2.6. A tallyk fajtái.....	21
3.3. Az input szerkezete	22
3.4. Modellezés folyamata	25
3.5. Konkrét mérések, a paraméterek változtatása.....	28
4. A dekonvolúció	32
4.1 A dekonvolúció, mint matematikai fogalom.....	32
4.2 A program szerkezete.....	34
5. A módszer alkalmazása valódi gamma-mérésekre	39
6. Javaslatok.....	41
Irodalomjegyzék	44
Ábrajegyzék	45
Köszönetnyilvánítás	47

1. Általános bevezető

1.1 A kutatómunka célja

Az általunk végzett kutatás fúrólukokban végzett természetes gamma-mérések Monte Carlo modellezésén alapul. A szénhidrogén-kutatásban a gamma-mérések kiértékelése során a következő probléma merül fel. A csökkent permeabilitású agyagrétegek által kibocsátott természetes gamma-sugárzás a tér minden irányában terjed, tehát azt nemcsak akkor érzékeli a szonda, ha éppen az agyagréteg felső és alsó határoló síkja között található, hanem feljebb és lejjebb is. Így az agyagréteg hatását ott is mérik, ahol nem agyag van jelen, az vastagabbnak tűnik, mint amilyen valójában. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy az impermeábilis rétegek hosszabbnak, így a szénhidrogén-készletek kisebbnek tűnnek, mint amilyenek a valóságban. A gamma-mérések alapján elkészített készletbecslések kisebb szénhidrogén-mennyiséget mutatnak, mint amelyek az elektromos szondázások alapján készülnek.

Ez a jelenség az előző mellett egyéb okokra is visszavezethető. Így az időkonstanssal (a szondasebesség ismeretében: vertikális felbontóképességi hosszal) történő átlagolásra, amely adott idő alatt beérkező beütésszámot az időszakasz közepére vonatkoztatja. Ezáltal mintavételezi a beérkezéseket és simító hatást fejt ki - a radioaktivitás véletlenszerű jellegéből adódó zaj csökkentése miatt alkalmazzák. Másik ilyen hatás a szonda méretéből adódik, hiszen a szonda hossza is simító hatást fejt ki. A szonda 5-10 cm hosszú. A harmadik hatást az előző bekezdésben említettük. Az egyes gamma-sugárzó centrumokból (atommagok) a gamma fotonok a tér bármely irányába távozhatnak, tehát az általuk keltett sugárzási tér hosszú idő átlagában vizsgálva közel gömbszimmetrikus, véletlen fluktuációkkal. A detektor által érzékelt tér ezen egyedi sugárzó centrumok által keltett tér szuperpozíciójaként fogható fel [Paul Glover, 102. old.]. A keltett tér vertikális metszete az (1.) ábrán látható. A tér hatásának rétegen való túlnyúlása a számítógépes modellezés során is kb. 10 cm-nek adódott.



Ábra 1: agyagréteg átsugárzása a nem agyagos szakaszra

Mivel a készletbecslés és egyéb kőzetfizikai paraméterek kutatása során nem a gamma-sugárzás jelenti az érdemleges információt, hanem az adott közeg agyagtartalma, olyan eljárást szeretnénk végezni, amelynek során az agyagtartalom vertikális profilját a gamma szelvélynél jobban közelítő számsor jelenik meg a mélység függvényében. Az eljárás során feltételezzük, hogy homogén, síkrétegzettségű rétegek (tehát vagy csak agyag-, vagy csak egyéb anyag, pl. homok, mészkő, stb...) fordulnak elő. A gamma-szelvényeken látható agyagvonal és homokvonal jelzi az agyag jelenlétét, vagy jelen nem létét. Természetesen léteznek kevert rétegek is, most ilyenekkel nem foglalkozunk. Az agyagindikációt tökéletesen jelző idősor a fentebb említett problémák miatt nem jöhet létre, tehát a gamma-szelvény egy homogén síkrétegzett rétegsor esetén sem diszkrét ugrásokkal az agyagvonalon vagy a homokvonalon fut, hanem folytonos görbét ír le. Célunk tehát az, hogy egy olyan agyagindikációt közelítő szelvényt hozzunk létre a sugárzás-szelvény korrekciójával, amelyen a rétegátmenetek mentén a sugárzás-szelvélynél meredekebb a lefutása, így pontosabb jelzést ad az agyagréteg elhelyezkedéséről.

1.2 A kettős feladat

A kitűzött célt a feladat két részre bontásával kívánjuk elérni. Monte Carlo modellezés segítségével a mértnél jobb felbontás érhető el, így ez lehetőséget ad a folyamat vizsgálatára. Ezt úgy valósítottuk meg, hogy a rétegsorok különböző elrendezéseit modelleztük, majd az ezek által keltett sugárzási teret mértük. Ez a probléma direkt feladata, ezzel a módszerrel az eddigi, mért gamma-szelvény által kimutatható agyagrétegeknél jóval kisebb vastagságú rétegek sugárzási tere vált vizsgálhatóvá. Mivel nagyon vékony (határátmenetben: végtelenül vékony, térbeli impulzus-szerű) agyagrétegek különbözőképp történő elhelyezésével bármilyen síkrétegzett rétegsor előállítható, ezek tereinek szuperpozíciójával bármilyen, síkrétegzett rétegsor által keltett gamma-sugárzási tér adódik. A gamma-sugárzás lineáris összegződése és mélységtől való függetlensége miatt a probléma lineáris rendszerként vizsgálható, egy ilyen pedig megismerhetővé válik az impulzusra adott válaszfüggvénye segítségével. Esetünkben az impulzust a nagyon vékony réteg jelenti. Ha képesek lennénk végtelenül vékony réteget előállítani és végtelenül finom mintavételi távolsággal modellezni, a direkt feladatot bármilyen síkrétegzett rétegsorra képesek lennénk előállítani. Igaz, itt a direkt feladatnak sokféle megoldása lehetséges, hiszen a radioaktivitás véletlenszerű folyamat, így minden egyes vizsgálatnál különböző válaszfüggvényt ad azonos elrendezés esetén is, annak átlagértékeit és szórását tudjuk megadni pontról-pontra. Megoldásnak a detektorba történő beérkezések összegét tekintettük, amelyet nagyszámú részecskeút-modellezés után kaptunk, ez a sugárzásintenzitás átlagértékével arányos érték, az arányossági tényező a szondasebesség. Természetesen nem tudunk végtelenül vékony rétegeket és mintavételezést előállítani - nem is lett volna érdemes, mivel a szonda a mérés során bizonyos sebességgel halad, így a zajt is méri: a felbontásának korlátai vannak, amelyeket az agyagátsugárzás szelvényre gyakorolt hatásának megszüntetése után sem tudunk átlépni. Azaz: a korábban említett simító, felbontáscsökkentő hatások közül csak az átsugárzás korrekcióját tűzhetjük ki célul, a zaj miatti átlagolását nem. Nem érdemes tehát a zaj miatt lehetséges legnagyobb felbontásnál vékonyabb rétegvastagsággal és mintavételezési távolsággal modellezni,

ha mégis így tennénk, csupán a zajt erősítenénk. Ily módon kaphatjuk a direkt feladat megoldását homogén, síkrétegzett modellre, bizonyos felbontással.

A második problémaként az inverz feladat megoldása következik. A mérés után a gamma-szelvényből kellene meghatározni a rétegek vastagságát és egymáshoz viszonyított helyzetüket. Ez utóbbi egy bináris adatsorral jellemezhető, amely a mélység függvényében megadja, hogy jelen van-e erősebben gamma-sugárzó anyag, vagy nincs. Nevezzük ezt az adatsort agyagindikációnak. A feladat tehát az, hogy a gamma szelvény segítségével közelítsük az agyagindikációt. Mivel a valódi rétegsort a modellezés során alkalmazott felbontással (amit a mérési távolság és a modellagyagréteg-vastagság jelent) tudjuk megadni, az elrendezést a modellagyagréteggel megegyező vastagságú rétegekből összetettnek láthatjuk az inverz feladat megoldása után, azaz a közelített agyagindikáció adatsort az ez által meghatározott felbontással adhatjuk meg. Esetünkben az agyagindikáció és az impulzusválasz-függvény konvolúciójaként áll elő a gamma szelvény, ezért az inverzió eredményeképpen egy dekonvolúciós szűrő együtthatóit szeretnénk megkapni. A Wiener-féle, átlagnégyzetes inverziót követő eljárást alkalmazva, ha a bemenetet és a direkt feladat megoldását ismerjük, ezek az együtthatók a Wiener-Hopf egyenletekből adódnak. Így egy dekonvolúciós szűrő (Wiener-szűrő) paramétereit határoztuk meg, amely élesítő (deriváló) hatást fejt ki a szelvényre, tehát javítja a felbontást. Az együtthatók meghatározását a Mathcad program segítségével végeztük, ez képes a neki megadott gamma-szelvények dekonvolúcióját elvégezni.

2. Természetes gamma-mérések a gyakorlatban

2.1 A mélyfúrási technológia szerepe a gamma-mérésekben

Manapság a mélyfúrási gyakorlatban rotary rendszerű-, illetve turbina-fúrást használnak. Mindkettő a fúrófej kőzetaprító hatásán alapul, a törmelék a mélyből a fúróiszap segítségével kerül fel a felszínre. A fúróiszapnak nagyon fontos szerepe van a fúrási technológiában, így a geofizikai mérések során kénytelenek vagyunk együtt élni a mérésekre kifejtett zavaró hatásával. A fúróiszap végzi a törmelék

mélyből való felhozását, hűti a fúrófejet, hogy az a folyamatos súrlódás hatására ne melegedjen túl, turbina-fúrás esetén meghajtja a fúrófejet forgató turbinát, illetve fenntartja, vagy igyekszik fenntartani a kőzetekben tapasztalható vertikális nyomásgradienst, hogy ne omoljon be a lyukfal, illetve túlnyomásos zónában ne törjön ki a pórusfolyadék. Ez utóbbi hatás az iszap sűrűségének növelésével segíthető elő, amely barit (BaSO_4) hozzákeverésével történhet. Az átlagos fúróiszap összetétele a brit offshore technológiában a 2. ábrán látható:

Table 1
Composition of a typical bentonite gel water based mud, density 1300 kg/m^3 . Components added to 1 barrel of water. (bbl: barrel; ppb: pounds per barrel)

Component	Quantity	Mass (kg)	Volume (litres)	% Mass	% Volume
Water	1 bbl	159	158.99	65.33	84.92
Bentonite	20 ppb	9.1	9.07	3.73	4.85
Caustic Soda	0.5 ppb	0.23	0.22	0.09	0.12
Soda Ash	0.5 ppb	0.23	0.10	0.09	0.05
High Viscosity CMC	1.5 ppb	0.68	0.47	0.28	0.25
Low Viscosity CMC	3.5 ppb	1.59	1.09	0.65	0.58
Barite	160 ppb	72.58	17.28	29.82	9.23

Ábra 2: Átlagos fúróiszap összetétele az Egyesült Királyság tengeri fúrási gyakorlatában. (Drilling Fluids Composition and use within the UK Offshore Technology, 2000, 8. old.)

A modellezésünk során többféle fúróiszap-sűrűséget tudtunk beállítani a modell jellemzőjeként, ehhez az offshore technológiában használt átlagos $1,5 \text{ g/cm}^3$ értéket, illetve a jelentős baritmennyiség hozzákeverésével adódó maximális, a kőzetek sűrűségét elérő $2,2 \text{ g/cm}^3$, és az ehhez tartó barit koncentráció értékeket használtuk. A fúróiszap a gamma sugárzás mérését annyiban zavarja, hogy kibocsát és elnyel radioaktív sugárzást. Mi csak ez utóbbi hatását modelleztük, forrásként nem használtuk a modellezéseink során a fúróiszapot, feltételeztük, hogy a kibocsátás egyenletes, így annak spektrumát ismerve az szűrési eljárással eltávolítható a szelvényről. A barit különösen alkalmas gamma-sugarak elnyelésére [Paul Glover, 104-105. old.]

Szintén fontos paraméter volt a modellezéseink során a lyuk átmérője, amelyre a jellemző 24 cm-t használtuk.

2.2 Természetes gamma-mérések technológiája

A mérést kisméretű szcintillációs detektor végzi. Modellezéseink során ezt henger alakú testnek feltételeztük, amely 7 cm átmérőjű, 10 cm magas és az egy cm vastag vasvázon belül nátrium-jodid kristályok találhatók. A szcintillációs detektorban, amikor a NaI kristályt megüti a gamma-foton, apró, önmagában érzékelhetetlen felvillanás keletkezik. A fényelektromos jelenség alapján ez egy fotokatódban elektronkilökődést indikál. Egy-egy felvillanás által keltett elektromos jel érzékelhetetlen, különböző feszültségű anódok sorozatára van szükség az elektromos mérés technikával érzékelhető jel létrejöttéhez, tehát a megfelelő erősítéshez. Az anódok között meglévő feszültségkülönbség miatt a sorozat minden egyes tagján több szekunder elektron lép ki (4-8-szor annyi, mint a primer becsapódó elektronok száma, egy anódon így 4-8-szoros az erősítés), mint ahány becsapódott. [Paul Glover, 98-99. old.]

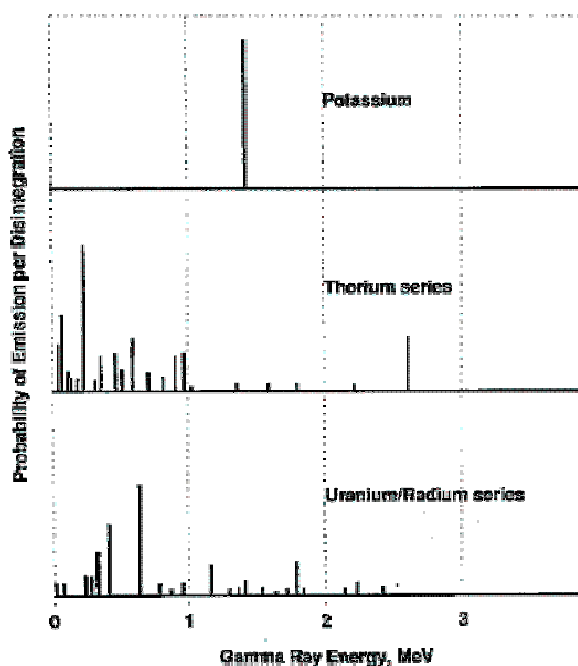
A mérések során a megjelenítéskor nem beütésszámként, hanem azzal arányos API egységekben láthatjuk a gamma-sugárzás intenzitását. Ez a skála 0-tól 200-ig terjed, a minimumát a Houstoni Egyetem referencia fúrólukában tapasztalt legkisebb gamma-sugárzási értékéhez, a maximumát ennek a lyuknak a legnagyobb értékéhez rögzítették, a kettő között a skálát 200 részre osztották. Mivel az API egységek arányosak a beütésszámokkal, a modellezés során a beérkezések számát mértük - ez ekvivalens azzal, mintha API egységekben mértünk volna. [Paul Glover, 99. old.]

Mivel a radioaktivitás véletlenszerű folyamat, a beérkezéseket mintavételezik, és bizonyos (időkonstans, T_c) szélességű időintervallumok közepére vonatkoztatják, az összes, időintervallumon belül történő beérkezést. Ekkor a vertikális irányú térbeli felbontás $F_t = T_c v$ képlettel adódik, ahol F_t a térbeli mintavételezési távolság, v a szonda haladási sebessége. Látható tehát, hogy minél gyorsabb a szonda, annál nagyobb a mintavételi köz, annál kisebb a felbontás. A mérést azonban valamikor be kell fejezni, tehát a szonda el kell, hogy érjen egy bizonyos sebességet, a felbontóképességet és a mérési időt is megfelelő értéken kell tartani,

meg kell találni a megfelelő egyensúlyt. Az általunk vizsgált szelvényeken a vertikális mintavételi távolság 10 cm. [Paul Glover, 100-102. old.]

2.3 Radioaktivitás és agyag

Radioaktív sugárzás akkor keletkezik, ha egy nem stabil atommag ionizáló részecskéket bocsát ki, ezzel egyidejűleg energiát veszít. Erre több mód van, melyek közül hármat említünk meg. Ilyen az alfa-bomlás, mely során az atommagból egy alfa részecske (He atommag) távozik, míg béta-bomláskor egy protonból egy neutron és egy elektron keletkezik. A gamma-bomlás általában az előző kettő kísérőjelenségeként lép fel. Az energia egy foton formájában távozik – a három közül ennek a legnagyobb az áthatolóképessége, ami alkalmassá teszi arra, hogy a geofizikai mérések során használjuk, mivel a kőzetben több tíz cm-en keresztül képes haladni.



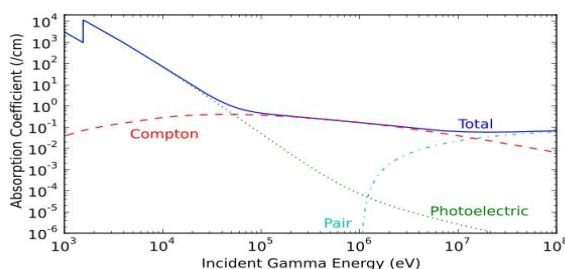
Ábra 3: A kálium, a tórium-sorozat és az urán-sorozat gamma-emissziós spektruma

A radioaktivitás a környezetben megtalálható anyagok gyakori tulajdonsága. Mivel azonban különböző anyagok eltérő aktivitással rendelkeznek, bomlási tulajdonságaik alapján jól megkülönböztethetővé válnak.

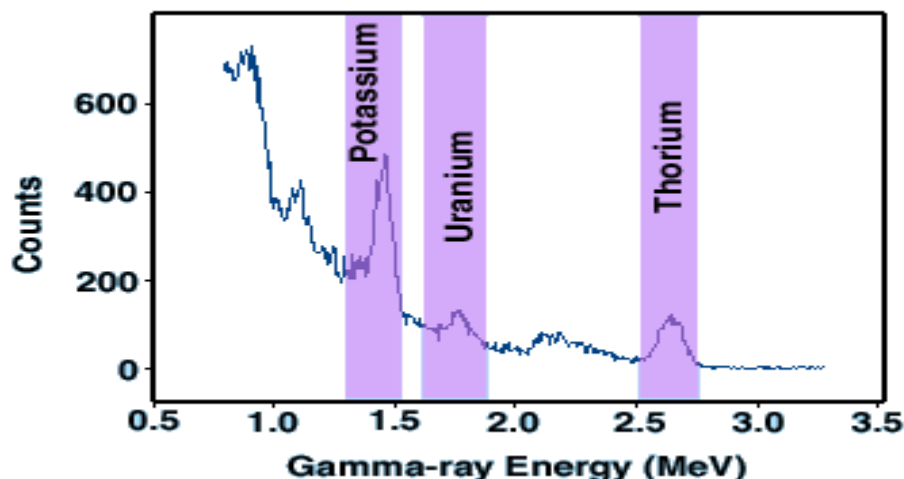
A természetes radioaktivitásért esetünkben három folyamat felelős: a kálium, valamint a tórium-, illetve urán- sorozat sugárzása. Utóbbi kettő több energiaszinten történő fotonkibocsátással jár, ám a spektrális gamma mérések megfelelő ablakaiban jól kivehetők domináns vonalaik.

Ugyan nem tudjuk előre megmondani, hogy egy bizonyos atommag mikor fog elbomlani, de a bomlás valószínűsége állandó. Ezért bevezethetünk egy erre a valószínűségekre jellemző mérőszámot, a bomlási állandót, amelyet λ -val jelölünk. Ha felírjuk az exponenciális bomlási törvényt, behelyettesítés után kapjuk, hogy $T = \ln 2 / \lambda$, ahol T a felezési idő, amely arra jellemző, hogy egy anyagban várhatóan mekkora időtartam alatt csökken a radioaktív magok száma a kiindulási érték felére. SI mértékegysége a másodperc. A természetben igen széles skálán mozog ez az érték, ennek következtében a Föld keletkezése óta a nagyon rövid felezési idővel rendelkező és ritka anyagok egy része már elfogyott. Ilyen pl. A ^{237}Np , aminek az uránhoz és Th-hoz hasonlóan bomlási sora volt – ez ma már csak mesterséges körülmények között állítható elő. A bomlási állandót a mintában lévő radioaktív anyag koncentrációjával megszorozva kapjuk az aktivitás értékét. Egy radioaktív forrás aktivitása azt mondja meg, hogy hány bomlás történik másodpercenként. Mértékegysége a Bq.

Általánosságban elmondható, hogy bár a Th-sor elemeinek nagyobb a bomlási állandójuk, a kálium valós jelentőséggel bír gyakorisága miatt. A legelterjedtebb radionuklidja, a ^{40}K az összes kálium 0,012%-a. Egy adott közegben a radioaktív forrás erősségét tehát nemcsak az anyag koncentrációja, hanem annak felezési ideje is meghatározza.



Ábra 4: az egyes gamma energiákra jellemző jelenségek



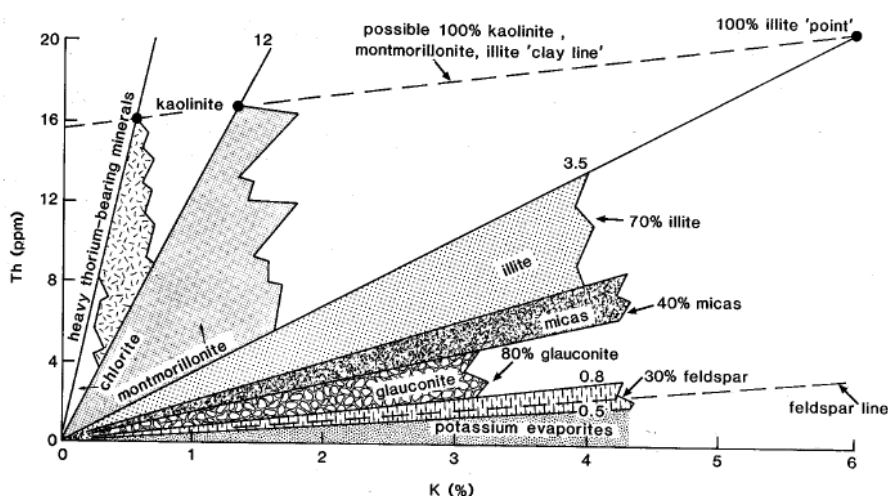
Ábra 5: a beérkezési gamma-spektrumon jól kivehetők a kálium, tórium, illetve urán jellemző vonalai

Az előfordulási gyakoriságok nemcsak a K és a Th között játszhatnak szerepet, hanem elvileg a Th, illetve U-sor elemei között is. A modellezésünk során feltételeztük hogy a rétegek, melyeket vizsgálunk, már elég régen jelen vannak ahhoz, hogy az elemek keletkezési és bomlási rátája egyensúlyi helyzetbe kerüljön. Ezt nevezik szekuláris egyensúlynak.

A 3. ábrán jól látható, hogy az alacsonyabb energia-régiókban viszonylag nagy valószínűséggel emittálódnak gamma fotonok. Ez azonban önmagában nem magyarázza a mérések során tapasztalt magas beütésszámot ebben a tartományban. A gamma foton közetben való terjedése nem zavartalan: energiától függően elnyelődhet, szóródhat, vagy párkeltés mehet végbe. Ez látható az (4.) ábrán. A mérés szempontjából fontos tartományban (100 keV-10 MeV) legjellemzőbb a Compton szóródás, mely során a foton elektronnak ütközik, mozgásának iránya megváltozik és egyúttal energiát veszít. Ez utóbbi frekvenciájának csökkenésében érhető tetten. Ez magyarázatot ad az alacsony energiájú csatornák magas beérkezési értékeire. Egy tipikus beérkezési spektrum látható az 5. ábrán.

Geológiai szempontból a radioaktivitás a kőzetek eltérő gamma-sugárzása miatt fontos. Az agyag a benne ásványok miatt nagy gamma-intenzitással rendelkezik, ami ez alapján megkülönböztethetővé teszi a rendszerint körülötte

előforduló anyagoktól (homok, mészkő...) A már említett kálium, urán és tórium előfordulási arányai alapján az agyag ásványi összetételére is következtethetünk. Ezek közül a legjellemzőbb és legfontosabb a Th/K arány. A 6. ábrán látható egy alapvető tendencia: Illit, montmorillonit, kaolinit, klorit sorrendben egyre nagyobb Th/K arányokat tapasztalunk. Ez a későbbiek során is látható eredményre vezet: az illit irányába mozduló agyagösszetétel magasabb gamma-beérkezési számokat mutat, mint a klorit irányába mozduló, vagyis ha arányaiban több kálium van az agyagban, az magasabb mérési értékeket eredményez.



Ábra 6: Agyagásványok Th/K aránya

2.4. A gamma-mérések jelentősége a szénhidrogén-kutatásban

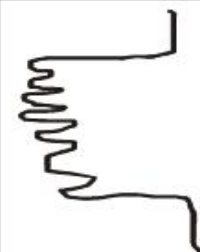
Mivel a gamma sugárzás mértéke jelzi az agyag jelenlétét, vagy jelen nem létét, potenciális tározókőzetek (pl. homokkő) mennyiségét becsülhetjük a gamma-szelvény alapján. A tározókőzetek szénhidrogén-szaturációjának és a tározótérfogatnak az ismeretében pedig készletbecslést végezhetünk. Azonban a teljes térfogathoz le kell vonni az agyag mennyiségét, amely kitermelhető szénhidrogén-tartalommal nem rendelkezik. Az agyagösszetevő arányát pontról pontra közelítőleg megadó képlet a gamma-szelvény alapján:

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (1.)$$

Itt I_{GR} a az agyag arányát jelenti adott mélységű pontban, GR_{log} a pontban aktuális természetes gamma-sugárzási értéket, GR_{min} a szelvény legkisebb, GR_{max} a szelvény legnagyobb gamma-sugárzási értékét jelöli. Tehát a gamma szelvény gyakran a felbontása miatt folytonos agyagösszetevő-arányt ad a mélység függvényében, míg az elektromos eljárás útján készülő FMI szelvények tanulsága szerint valójában a gamma-szelvény felbontásánál vékonyabb agyagrétegek helyezkednek el a rétegsorban. Tehát az agyagkoncentrációnak a gamma-szelvényen látható folytonossága, réteghatár-elmosódása ellenére gyakran vékony agyagrétegek váltakoznak tározó rétegekkel. A folytonosság az alacsony felbontás eredménye. Természetesen egy nagyobb felbontású szelvényre is folytonos görbe lenne illeszthető, mivel az üledékképződési folyamat során a képződési környezetek folytonosan váltakoznak. Ez azonban meredekebb lefutású lenne, mint a réteghatárokat kissé, és a nagyon vékony agyagrétegeket szinte teljesen elmosó gamma-szelvényé.

A gamma-szelvényen bejelölhetünk agyagos (nem tározó) szakaszokat, ahol az intenzitás egy bizonyos határértéket meghalad. Ezeket az agyagos szakaszokat levonva a teljes tározó hosszából kapjuk a valódi tározókapacitással rendelkező hosszt. Ezt a tározó területével, a porozitással és a szénhidrogén-szaturációval szorozva kapjuk a tárolt szénhidrogén térfogatát. Tehát, ha a valódi agyagrétegek teljes vastagsága kisebb, mint amit a nyers gamma-szelvényen agyagvastagságként bejelöltek, akkor a valódi tározókapacitás nagyobb, mint a látszólagos. A gamma-szelvények alapján szaturációt és porozitást nem lehet ugyan megállapítani, de ezeket a paramétereket egyéb mérések alapján ismertnek feltételezve az agyagrétegek vastagsága alapján készletbecslést lehet végezni. Az így végzett becslések rendszerint alacsonyabb szénhidrogén-mennyiséget mutatnak, mint az FMI szelvények alapján végzett számítások, és az utóbbiak állnak közelebb a valósághoz. Ha a gamma-szelvények alapján végzett készletbecslést túlságosan nagy súllyal veszik figyelembe, amikor a termelési projekt elindításáról vagy folytatásáról döntenek, akkor az esetlegesen alulbecsült szénhidrogén-mennyiség miatt elképzelhető, hogy a termelést nem indítják el, vagy leállítják, pedig valójában

nyereséges lenne. A nem ismert tározókapacitás negatívból pozitívba billentheti a projekt mérlegét.

Shape	Smooth	Environments	Serrated	Environments
Cylinder Represents uniform deposition.		Aeolian dunes Tidal sands Fluvial Channels		Deltaic distributaries Turbidite channels Proximal deep-sea fans
Bell Shape Fining upwards sequences.		Tidal sands Alluvial sands Braided streams Fluvial channels Point bars		Lacustrine sands Deltaic distributaries Turbidite channels Proximal deep-sea fans
Funnel Shape Coarsening upward sequences.		Barrier bars Beaches Crevasse splays		Distributary mouth bars Delta marine fringe Distal deep-sea fans

Ábra 7: A gamma szelvények alakja és az üledékképződési környezetek közötti kapcsolat

A gamma-szelvények alapján következtetni lehet az üledékképződési környezetre is. A gamma-szelvény simasága illetve gyors változásai utalhatnak a képződési környezetben lejárló folyamatok állandóságára, illetve gyors változásaira. Pl. mélytengeri turbidit-összletekben az időnként bekövetkező zagyrák gyors váltakozást, a rétegek agyagtartalmának és így a szelvény gamma-sugárzási értékének gyors változását okozzák, míg eolikus környezetben, vagy a tengerek árapály-zónájában hosszú ideig ugyanaz a folyamat zajlik. A szelvény egyenletes, csökkenő (tölcsér, pl. alluviális környezet), vagy növekvő (csengő, pl. tengerpartok) alakja pedig a szemcseméret időbeli állandóságára, nagyobbodására, vagy kisebbedésére utal. [Paul Glover, 109-110. old.]

3. A modellezés

3. 1. A Monte-Carlo módszerek

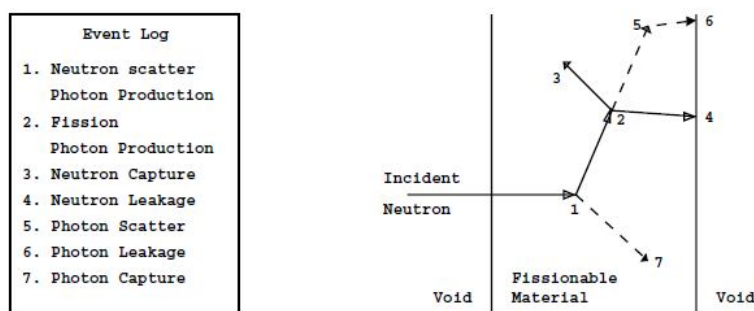
A Monte Carlo módszer olyan számítási algoritmus, amely egymás utáni véletlenszerű mintavételen alapul. Olyan esetekben (ahogy jelenleg is) alkalmazandó, amikor egy probléma determinisztikus megoldása akadályokba ütközik. A mi példánkban ez az akadály az, hogy a transzportegyenlet megoldását sokkal hosszabb és bonyolultabb számítások árán kaphatnánk meg – ellenben a Monte Carlo módszer gyors, szemléletes és nem utolsósorban megbízható eredményt biztosít.

Nézzük most a módszert atomfizikai folyamatok tükrében. Részecskék mozgásának leírása a megszokott értelemben a transzportegyenlet integro-differenciális alakjának megoldásából áll. Ezzel szemben a Monte Carlo módszerrel való közelítés ugyanazon egyenlet egy másik – integrális - alakját elégíti ki. A fő különbség az ún. diszkrét ordináta módszer – azaz a hagyományos értelemben vett problémafelvetés és egyenletmegoldás, valamint a Monte Carlo módszer között a következő: A diszkrét ordináta módszernél a teret kis részekre osztjuk fel, a részecskék pedig egyikből másikba vándorolnak. Ahhoz, hogy egy ilyen tartományból egy másikba jusson el, meghatározott és jellemző időre van szükség. Ezt a teret, illetve metrikát a matematikában taxicab geometria, vagy Manhattan távolságként ismerik. Ennek határértéke (vagyis, ha a tartományokat végtelenül kicsinek vesszük) a mindennapokban megszokott euklidészi távolság, ahol adott táv megtételéhez adott idő kell, a térjellemzők pedig pontról pontra változnak. Ezt a módszert tehát az integro-differenciális transzportegyenlet írja le – időbeli és térbeli deriváltak szerepelnek benne. Ezzel szemben a Monte Carlo módszer elemi egységei az események (pl. szóródás, bomlás, elnyelődés), amik térben és időben különállóak. (az előbbinél ezek az elemi egységek a tartományok – amelyek határértékben a tér egy-egy pontját jelentik). Mivel nem függ a részecske mozgása időtől és tértől, csak az események bekövetkezési valószínűségétől, nincs idő és térbeli derivált az egyenletben – ebben az esetben a tapasztalaton alapuló integrális alakkal van dolgunk. [Briesmeister, 1997] A probléma jellege első ránézésre is

numerikus módszerek használatáért kiált. Egy sokaság (forrás atomjai, azaz a bomló anyag) egy meghatározott geometriai paraméter-együttes mellett valószínűségi alapon vizsgálendő. A konkrét esetben a már elbomlott atomok gamma fotonjainak életútja az, amire kíváncsiak vagyunk. Ennek valós modellezését a használt program, az MCNP a Monte Carlo módszert alkalmazva véletlenszerű kísérletekkel oldja meg. Bár forrásként radioaktív anyagokat definiálunk, ezek egyszerre akár több energiaszinten is képesek sugározni, így a forrás elemi egységei nem a bomló magok, hanem a fotonok – ezek számát adjuk meg a későbbiekben, ha a kísérletek számát változtatjuk. Egy részecske „indításakor” a program a véletlenszám-generátorral egy 0 és 1 közötti számot választ ki, amely a gamma foton útjának kezdeti helyzetéhez viszonyított irányát adja meg. Ezután újabb sorsolás következik, ezúttal az úthosszra vonatkozóan. Ekkor lépteti a részecskét a kiválasztott helyre, ahol az a sorsolásokat előlről kezdi – egészen addig folytatódik ez a sorozat, amíg a foton valamilyen módon (az érvényes terület elhagyása, detektálás, abszorpció...) el nem vész. Mindeközben eseményválasztásokat is végrehajt azzal kapcsolatban, hogy ütközéskor mi történik a részecskével, szintén a véletlenszám-generátor segítségével (8. ábra). Ezeket a lehetőségeket a fizikai háttér határozza meg és a bekövetkezési valószínűségek szerint történik a választás. Az úthosszak és az irányok kisorsolásában a programnak tehát egyetlen faktort kell számításba vennie a véletlen kívül: a fizikát. Vagyis hogy milyen elrendezésben van jelen az a közeg, amelyben a részecskének mozognia kell, pl. rácsszerkezet, anyag fajtája, összetétele, stb. Ezek a fizikai paraméterek a program esetében egy katalógusból választhatók ki. Ilyen módon a bonyolult fizikai rendszereket egyszerű, statisztikai alapon meghatározott, tapasztalati keretrendszer váltja fel.

Végeredményként a program egy egymásra rakódó véletlenrendszert alakít ki egyetlen foton életútját követve. A Monte Carlo módszer lényege az, hogy kellően nagyszámú kísérlet efféle véletlen folyamatait összegezve megbízható megoldást kapjunk. Minél több fotont vizsgálunk, a nagy számok törvénye értelmében annál biztosabb az eredményünk. Ez a módszer (a kísérletek számának növelése a megbízhatóság érdekében) csupán egy a sok közül, de mindenképpen a legegyszerűbb. A vizsgált részecskék számának növelésével (minthogy a hiba $1/\sqrt{N}$ –

nel arányos, ahol N a kísérletek száma) igen lassan csökken a kívánt érték alá a hiba, ami a futási idő megnövekedését jelentheti. A rendszer lineáris viselkedése miatt megtehetjük, hogy bármekkora kibocsátásszámmal dolgozzunk, hiszen az egyes kísérletek egymástól függetlenek, eredményeik összeadódnak. Az adott idő alatt történő beérkezések száma pedig függ a szondasebességtől, mint szorzófaktortól, a kibocsátási számot, amely a modellezési - elméleti – szondasebességtől szintén függ, szabadon választhatjuk meg, ellentétben a méréssel, ahol a szondának egy bizonyos sebességgel kell haladnia. A modellezés során csak a számítógép gyorsasága szab határt a mérések számának, így az elméleti szonda lassíthatóságának.



Ábra 8: egy neutron életútja az MCNP modellezés során

3.2 Az MCNP program

Dolgozatunkban leírtuk, hogy a valóság modellezésére jelen helyzetben legalkalmasabb a Monte Carlo módszer. Ezt az MCNP, azaz Monte Carlo N-Particle Transport Code nevű program használatán keresztül valósítottuk meg. A Los Alamos-i Nemzeti Nukleáris Laboratórium fejlesztette ki a negyvenes években, bár a módszer alkalmazása sokak szerint régebbre nyúlik vissza. Az MCNP a II. világháború utáni számítógép-építési hullámmal meglovagolva jöhetett létre a kor nagy tudósainak (köztük Neumann János és Enrico Fermi) közreműködésével.

Minthogy a programot kifejezetten nukleáris problémák modellezésére fejlesztették ki, a geofizikai rendszerek alkalmazásán túlmutat – az eszköztár csak egy részét használtuk fel.

A program háttéréül a már leírt Monte Carlo módszer és járulékos elemei szolgálnak. Használata rendkívül egyszerű – egy input fájlt a létrehozása után a programmal le kell futtatni, amely idő alatt az elkészíti az outputot, amelyből a kívánt információk a modell tulajdonságairól kinyerhetők. Az inputban a valóság geometriai elrendezését, a geológiát, illetve a forrás tulajdonságait kell kódolni. Ezek mellett további lehetőségek is adóttak, egy részükre rövidesen kitérünk, de az előzőek adják a bemenet törzsét.

A továbbiakban az MCNP fontosabb funkcióit tekintjük át nagy vonalakban.

3.2.1. Nukleáris adatok és reakciók könyvtárai

Az atomfizikai adatok több katalógusból származnak (ENDF, ENDL, ACTL) – ezek nukleáris technikai rendszerek gyűjteményei, melyek egyik célja a valóság lehető leghűbb modelljének felállítása, másik pedig az adatok folyamatos revíziója és pontosítása. Ezen adatok az MCNP-vel kompatibilis formátumban vannak kódolva és egy ún. XSDIR (pontosabban 2 db) könyvtárban kerülnek felsorolásra. Az input összeállításánál az anyagokra és reakciókra vonatkozó egységek ebből a tárból kerülnek beolvasásra az ún. Z Aid azonosító számokon keresztül. Különböző problémákhoz más és más jellegű, illetve tartalmú háttérkönyvtárak csatolódnak – pl. neutron és foton interakciókra természetesen különböző háttérkönyvtárban tárolódnak – egyhez akár több táblázat is tartozhat. Dozimetriai adatokra pedig még több ún. hatás keresztmetszet könyvtár áll rendelkezésre, amelyek az atomok nyugalmi és gerjesztett állapotára vonatkozóan is tartalmaznak információt. [Briesmeister, 1997] Mindezek közül nekünk a foton interakció táblázatra van szükségünk, erre hivatkozunk, amikor az inputban megadjuk az anyagokat.

3.2.2. Forrás meghatározás

Az MCNP a forrás meghatározására több lehetőséget biztosít. Idő, tér, irány, energia, de akár térfogat, vagy felület független változójaként is definiálhatjuk a forrást. Lehetőség adódik az eloszlások súlyozására is. Ezen kívül az MCNP tartalmaz beépített, analitikus eloszlásfüggvényeket (pl.: Watt, Gauss, Maxwell), amelyek legtöbbször bomlás, vagy fúzió energiaviszonyait hivatottak leírni. Ezek közül

némelyiket szintén lehet súlyozni. legyen: [Briesmeister, 1997] Mi egyenletes eloszlást használtunk az agyag régióban, mert ott egyenletesnek feltételeztük a bomló magok eloszlását.

3.2.3. Tallyk és outputok

A tally a geometriának az a része, amely az atomfizikai jellemzőkről virtuálisan adatot gyűjt. Hogy milyen adatokat, azt a tally típusa adja meg, gyakori a fluxus vizsgálata különböző felületeken – erre számtalan lehetőséget nyújt a program. Jelen esetben a tally a valóságos detektor, amely a beütéseket érzékeli. Ennek megfelelően mi egy ún. pulse height tallyt használtunk, ami a beérkezések energia-eloszlását is képes regisztrálni.

A tally által gyűjtött információk mellett az output fájlban általános összegzés található, amely a program lefutásáról ad bővebb tájékoztatást. Ez a fizikát és a Monte Carlo szimuláció pontosságát jelenti. Ha hiba történik a lefutásban, részletes összegzést ad erről is. A hibaszámításra különös hangsúly kerül, az összes tallyra vonatkozó statisztikai ellenőrzést, valamint „ten pass/no pass” teszteket hajt végre a program, melyet az outputban közöl (10 statisztikai teszt, melyek közül mindegyiknek sikeresnek kell lennie).

3.2.4. Hibabecslés

Az ún. becsült relatív hiba definíciója S_x/x , ahol S_x az átlagtól vett becsült eltérés, x a becsült átlag. Ezt a számot R-rel jelöljük és az outputban a tally információi között találjuk. Ehhez a becsléshez szükséges mennyiségek minden Monte Carlo részecsketörténet után számolásra kerülnek. Egy jól viselkedő tally R növekedésével $1/\sqrt{N}$ -nel arányosan nő. Tehát ha kétszeres pontosságot szeretnénk elérni, négyszeres mennyiségű részecskét kell indítanunk. A becsült relatív hiba alkalmas a becsült átlag megbízhatósági tartományának kijelölésére, ami a végső eredmény szempontjából alapvető fontosságú. A Centrális Határeloszlás Tétele szerint ahogy N a végtelenbe nő, 68%-os valószínűséggel lesz a valódi eredmény x R sugarú környezetében, 95%-os valószínűséggel $2R$ sugarú környezetében.

[Briesmeister, 1997] Fontos megjegyezni, hogy ezek a számok a Monte Carlo modellezés pontosságára utalnak, nem pedig a valós eredmény hibájára a fizika által meghatározott értékhez viszonyítva. Hogy a használót informálja az MCNP egy ún. FOM (figure of merit) számot használ, amit az output végén jelenít meg. Meghatározása: $1/(R^2T)$, ahol T a számításra fordított idő. Minél hatékonyabb a Monte Carlo szimuláció, a FOM értéke annál nagyobb lesz, hiszen kevesebb idő kellett egy adott R érték eléréséhez. N növekedésével a FOM nagyjából állandó marad, hiszen az R^2 az $1/N$ -nel, a T az N -nel arányos. [Briesmeister, 1997]

3.2.5. Szóráscsökkentés

Az imént írtuk, hogy R értéke arányos $1/\sqrt{N}$ -nel. Egy modellezés során problémát jelenthet, ha a program lefutási ideje túl hosszú. Mivel a számolási idő egyenesen arányos N -nel, adódik, hogy $R=C/\sqrt{T}$, ahol C egy pozitív konstans. Ennek értéke a tally megválasztásától és mintavételi tulajdonságoktól függ.

Az eddig bemutatott modell az analóg Monte Carlo modell, amelyben pontosan a fizikai háttérnek megfelelően történnek a részecskemozgások. Ez bizonyos esetekben azonban csődöt mondhat mert a hiba túlságosan nagy. Ekkor a nemanalóg módszert használjuk, amelynek a lényege abban áll, hogy azokat a részecskéket, amelyek számunkra „érdekesekek”, megpróbálunk jobban követni, mint azokat, amelyek érdektelenek. Ennek érdekében az érdekeseket nagyobb súllyal kell számításba venni, ami a végeredményben hibás következtetésre vezetne, ezért a végén vissza kell őket súlyozni. Így pl., ha valamely részecskét q -szoros valószínűséggel követünk érdekessége miatt, a végén $1/q$ -val kell szorozni. [Briesmeister, 1997]

A korábban leírtak miatt alkalmazandók a szóráscsökkentő eszközök. Sokféle létezik, több kategóriába sorolhatók, most csak a fontosabbakat mutatjuk be. Megjegyezzük, hogy bizonyos problémák modellezéséhez nem csupán segítség, hanem feltétel a szóráscsökkentő eljárások használata, (pl. mély behatolású közegekben végzett vizsgálatok esetén).

Energia, idő levágás: az érdektelen energiájú, vagy a rendszerben túlságosan sok

időt eltöltő (pl. túl kicsi) részecskék követésére nem szánunk számítási időt.

Geometria-, energia-, vagy súlyfelbontás orosz rulettel: ha egy részecske kisebb fontosságú területre lép, azt orosz rulettel lehet, vagyis bizonyos százalékokat nemlétezőnek tekinteni, a maradékot viszont nagyobb súllyal számításba venni – így időt spórolunk. Ellentétesen, ha nagyobb fontosságú egységbe lép a részecske, azt több részecskéként lehet figyelembe venni, de azokat kisebb súllyal kell ellátni.

Súly ablak: A túl magas és alacsony tömegeket orosz rulettel eltávolítjuk. Ez segít a tömegértékeket egy elfogadható tartományban tartani. [Briesmeister, 1997]

3.2.6. A tallyk fajtái

Az MCNP programban hét alapvető tally típust különböztetünk meg, melyek közül hét alkalmas neutron, hat foton és négy elektron problémák modellezésére. A modellezéseinket pulse height tallyval végeztük. Ez a bejövő impulzusok energiaeioszlását határozza meg egy valódi detektorhoz hasonlóan.

Tally Mnemonic				Description	
F1:N	or	F1:P	or	F1:E	Surface current
F2:N	or	F2:P	or	F2:E	Surface flux
F4:N	or	F4:P	or	F4:E	Track length estimate of cell flux
F5a:N	or	F5a:P			Flux at a point or ring detector
F6:N	or	F6:P			Track length estimate of energy
		or	F6:N,P		deposition
F7:N					Track length estimate of fission energy
					deposition
F8:N	or	F8:P	or	F8:E	Pulse height tally
			or	F8:P,E	

Ábra 9: Tally típusok

3.3. Az input szerkezete

Az MCNP bemeneteként egy input fájlt (valamilyen szöveges formátumban – legegyszerűbben .txt kiterjesztéssel) hozunk létre. Ennek kereteit a program használati útmutatójából megfelelően el lehet sajátítani, a következőkben ennek részletezésével foglalkozunk. Mivel rendkívül széleskörű használati lehetőségeket biztosít, csak egy csekély részére van szükségünk geofizikai célú problémák modellezésére, ezért csak a számunkra érdekes részletek bemutatását tűztük ki célul.

Előzetesen néhány általános információ:

A különböző kódokat kártyáknak (angolból: card) nevezzük.

Általában kétféle számérték-megadás használható, amire a negatív előjel használatával (vagy elhagyásával) van lehetőségünk. (pl. sűrűség esetén 10^{24} atom/cm³, vagy g/cm³). Ez megtehető, mivel a természetben csak pozitív értékeket felvevő jellemzőket adunk meg így. Az input fájlban megadott távolságra vonatkozó számok mindig cm-ben értendők. Hasonlóan az energia és hőmérséklet MeV, hatáskeresztmetszet barn, tömegsűrűség g/cm³ egységekkel használatosak. A \$ jel után kommenteket szűrhatunk be, amelyeket a program nem vesz figyelembe, csupán a tájékozódást segítik.

Bizonyos bemeneti egységek (pl. felületek, cellák és adatok) meghatározása után egy üres sor használandó, de az adatkártyák között nem szükséges alkalmazni őket.

A. INP File

An input file has the following form:

```
Message Block  
Blank Line Delimiter }Optional  
One Line Problem Title Card  
Cell Cards  
.  
.  
Blank Line Delimiter  
Surface Cards  
.  
.  
Blank Line Delimiter  
Data Cards  
.  
.  
Blank Line Terminator (optional)
```

Ábra 10: az input szerkezete

A legfelső sorba cím kerül, melyet sorkihagyás nélkül a geometriai térfogatrészek, ún. cellák meghatározása követ. Az első oszlopban sorszám, másodikban az anyagra jellemző sorszám – ezt a következőkben fogjuk használni - a harmadikban pedig az anyagra jellemző sűrűségérték szerepel. Az ezek után következő számok az input második részében megfogalmazott felületi kártyák sorszámaikat tartalmazzák, ezek a felületek alatti/feletti, azokon belül/kívül eső tartományokra utalnak, amelyek között halmazműveleteket végezhetünk. A sorszám előtt álló negatív jel a fordított normálist jelzi, hengerfelület esetén a normális kifelé mutat. A kettőspontok a tartományok metszetét, a szóköz a tartományok unióját, a # jelek a negáltját jelentik.

Az input második része a már említett felületek definiálása: az első oszlopban sorszámozás (amelyek szerint a felületeket azonosíthatjuk a cellák megadásánál), a következőkben a felületelem jellege (henger, sík, kúp, vagy gömb) és jellemző paraméterei - ezek az adott felület geometriai egyenletéből következnek. Példánkban csak hengerek (cy) és síkok (py) szerepelnek. Az y henger esetén tengelyt, sík esetén normálist jelent tehát itt az y tengelyre illeszkedő hengereket és arra merőleges síkokat jelöli. Több-részecske (N-Particle Transport Code) programról lévén szó, a vizsgált részecske típusának meghatározása következik, esetünkben ez foton, jelzése: mode p.

Az ezt követő egység az anyagok definiálása. Az első oszlopban m betű után a cellák sorszáma utalva egy adott anyagot jelölünk. A sorokban az adott anyagban jelen lévő elemek meghatározása és aránya következik az alábbiak szerint: ZZZAAA.nnX, ahol ZZZ az anyag rendszáma, AAA a tömegszáma (tehát különböző izotópokat meg lehet jeleníteni) nn a hatáskeresztmetszet könyvtárbeli kódjele, X pedig az adatok osztálya, pl. foton, neutron... Utóbbi kettő használata nem kötelező. Utána az anyagban való előfordulási arány következik. Eszerint pl. ha egy anyagban 16 tömegszázaléknyi deutérium szerepel, azt így jelöljük: 1002 -16. A természetes keverékkel szereplő anyagoknál nem kell izotópra jellemző számot beírni, ebben az esetben 0-kat használunk, az izotóparányt a program felismeri és behelyettesíti. A modellezésben végig így jártunk el – pl. természetes kálium keverék 0.001 atomi aránnyal: 19000 0.001. Nem szükséges az arányokat százalék szerint megadni, elég,

ha egymáshoz a valósághoz mérten aránylanak – ebben az esetben figyelmeztetést küld a program, de szabály szerint működik.

A következő egység a forrásdefiníciós kódsorozat. Itt határozzuk meg a forrásra (esetünkben az agyagban található radioaktív anyagokra) vonatkozó geometriai-, és energiaviszonyokra jellemző tulajdonságokat. Az sdef kóddal kezdődik a sor, amely ennek a résznek a bevezetője, majd erg a kibocsátási energiát jelöli, ezután pedig a forrásrégió geometriai tulajdonságainak leírására szolgáló egyes paraméterek következnek (úgy, mint: radiális távolság, tengelyek, origó...) – esetünkben henger alakú geometria használatos, így az ehhez kapcsolódó paraméter-együttessel dolgoztunk. A geometria és az energia jellemző kódjai a sorban felcserélhetők. Mindkét esetben megadható konkrét érték, valamilyen eloszlás, vagy egy másik elrendezés függvénye – ha változót használunk, dn-el jelöljük, ahol n egy később definiálandó forrás változó.

Az si kód –a forrás információs sáv – ide kerülnek azok a kitüntetett értékek, amik egyértelműen meghatározzák a geometriát, illetve az energiákat. Az sp az si által jelölt egységekre vonatkozó valószínűségeket jelzi. Az si-nek és sp-nek többféle értéke lehet, pl. diszkrét érték (L), lépcsős függvény (ha nem egy ponthoz, hanem egy hely környezetéhez tartozik egy bizonyos érték – ún. binék – dobozok - (H), valamilyen beépített eloszlásfüggvény (V), vagy egy másik kártyára utaló szám (S).

A forrás definiálása után a tally meghatározása következik: pl.: f8:p 4; azt jelenti, hogy a 8-as számú tally (pulse height distribution), fotonra vonatkozik és a 4-es cellában található.

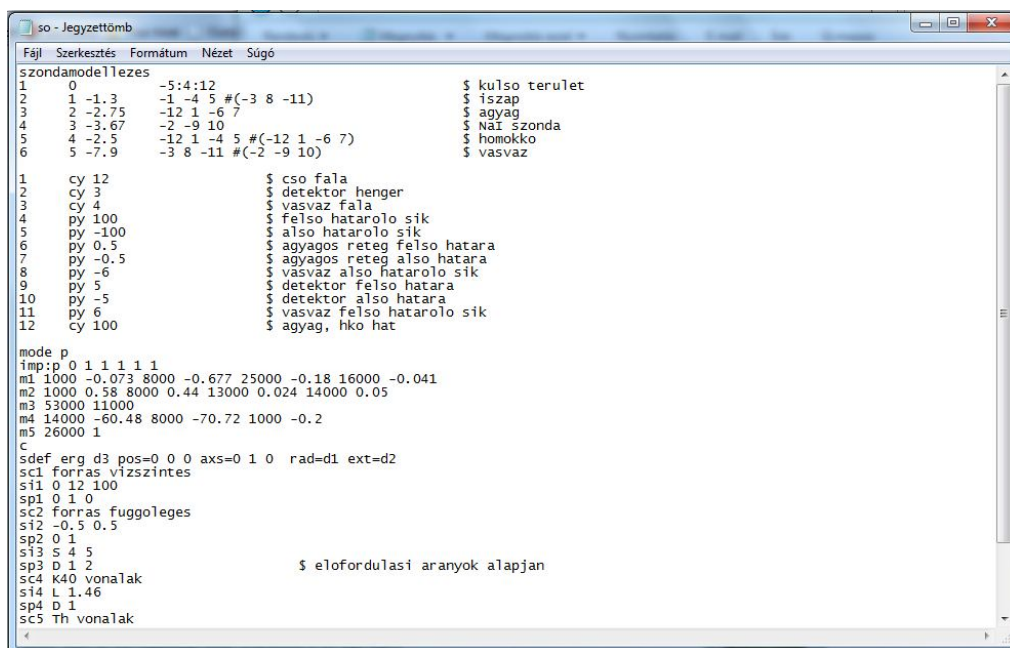
Az e0 kóddal az energiaablakokat jelöljük ki, az outputban ekkor nemcsak beütésszámot, hanem az „energia függvényében ábrázolt” beütésszámot is találhatunk. Az idézőjel indokolt, a valós spektrális gamma mérések minimum 256 csatornájához képest az MCNP (formai korlátok – maximum 80 karakter kerülhet egy sorba) néhány ablaka nem jelentheti a valós SGR mérések szakszerű modellezését. Az alapvető tendenciák (K, Th domináns vonalak) azonban így is jól kivehetők, jóllehet egy ilyen felbontású spektrum elégtelen lenne az agyag milyenségének Th/K és egyéb arányok alapján történő meghatározására.

A legvégső kód az nps, az elindított részecskék száma. Ennek megfelelően nagyinak kell lennie ahhoz, hogy a modellezés átmenjen az MCNP összes statisztikai tesztjén.

3.4. Modellezés folyamata

A modellezés első lépése az input fájl összeállítása. A futtatást követően egy adott geológiai rendszer mellett több ponton (minél sűrűbben) helyeztük el a szondát a modellfúrólyuk mentén, majd a beérkezési számokat feljegyeztük. Megjegyezzük, hogy a valóságos mérésekhez képest sűrűbben végeztük a vizsgálatot, ezért annál jobb felbontást kaptunk. A tapasztalat szerint kb. 40 cm távolságig észlelhető a gamma-sugárzás szilárd közegben, ennek ismeretében jártunk el a detektor eltolásánál.

A futási időre egy átlagos geológiájú környezetben 1000000 részecske indítása esetén nagyságrendileg egy perc adódik. Ez azt jelenti, hogy a mintavételi távolságtól függően kb. $n \cdot 1$ perc alatt végezhető el egy klasszikus geofizikai szonda mérésének modellezése; n a mérések számát jelöli. Ehhez számításba kell venni, hogy a mérés a szonda mozgatásából és adott helyen történő időleges megtartásából áll. Ezek a mérési pontok, ezen helyzetekre kell a geometriát definiálni. A modellezés során az inputot ezek szerint kell változtatni (vagy a forrástartomány, vagy a szonda eltolását végezve). Mivel a detektort egy vasváz veszi körül, több adatot kéne átírni a geometriában, ha a valósághoz hasonlóan a szondát tologatnánk, ezért gyakran célszerű a forrásrégiót mozgatni. Először nézzük a saját modellezésünk során összeállított input fájlt – és a paraméterek változtatását. A mérési elrendezés az 1. ábrán látható.



Ábra 11: egy jellemző input, amellyel dolgoztunk

6 db cellát definiáltunk, ezek sorra a következők: külső terület, fúróiszap, agyag, szonda, homokkő, szonda váza. Mint látható, az érdektelen területnek nem adtunk sűrűséget, a sorszáma is 0, nem használjuk a későbbiekben. A fúróiszaphoz először a fúrólyukat kell körülhatárolni (-1 -4 5) – tehát az 1. felület fordított normálissal – ez a cső belső része, majd a 4. felület fordítottan és az 5. eredeti irányban – ezek a felső és alsó határoló felületek. Ebből a hengerből kell (#-vel) kivonni a szondát, amit a 3-as sorszámmal jelöltünk. A többi egységet értelemszerűen, az előzőhöz hasonlóan végeztük. Változtatandó paraméterként az agyag sűrűsége jelenik meg – attól függően alakítjuk (kb. 2,5 és 3 g/cm³ között), hogy pontosan milyen összetételű agyagot modellezünk. Ez az agyagásványok arányának és azok sűrűségének, illetve a porozitásnak ismeretében egyszerűen számolható.

A felületek definiálása a fent említettek szerint történik, mi csak c és p kódokat használtunk, azaz a teljes geometriánk leírható y tengelyű hengerekkel és y tengely irányába eső normálisú síkfelületekkel, y ez esetben a vertikális irányt, a fúrólyuk tengelyét jelenti. A cy-ra egyetlen paraméter kerül, a henger sugara, hiszen a magasságát a geometriánkban a síkfelületek általi lemetzés határozza meg. A py

esetében is egy szükséges megadandó paraméter van, az origótól mért távolság az y tengely mentén.

Érvényes területnek egy 100 cm sugarú és 200 cm magasságú hengert határoztunk meg. Ez körülbelül ideális kompromisszum a futási idő csökkentése és a lehető legnagyobb pontosság elérése között. Az agyagréteget ebben az esetben 1 cm vastagnak vettük, majd később, mint változtatandó paraméter, növeltük.

A mode p beállítás segítségével közöljük a programmal, hogy fotonokat detektálunk.

A cella fontosság (imp) beállítással különböző fontosságú térfogatokat adtunk meg. A 0 fontosságú cella az a térrész, ahonnan már biztosan nem érzékelünk fotonokat és érdektelenek azok a részecskék, amelyek ebbe a térfogatba kerülnek. Esetünkben ez a külső tartomány, a többi cellát egységesen 1 fontosságra állítottuk be.

A cellákban lévő anyagok elemek szerinti arányainak megadása a már ismertetett módon történik, pl. a Nal szonda esetében nem ütközünk nehézségekbe, mivel ugyanannyi nátrium atommagot tartalmaz a cella, mint jód atommagot. A fúróiszap anyagi összetételét szakirodalomból vettük. A legbonyolultabb feladat az agyag összetételének számítása. Ismerjük az egyes ásványok jelenléti arányát (ez egy változtatandó paraméter) és ezek elemi összetételét, valamint egy kezdeti (feltételezett) porozitás-értéket – ez utóbbi ásványvizet is jelenthet, tehát a térfogat porozitás által engedett arányán felül víz van jelen. Ezekből elemi matematikai módszerekkel kiszámítható a teljes agyag összetétele. Mivel a modellezés során gyakran változtattuk az összetételt, egyszerű programozással minimálisra csökkentettük az ezen probléma által támasztott nehézségeket.

Azt szeretnénk elérni, hogy a forrás az agyagrétegben egyenletesen legyen elosztva. Figyeljük meg, hogy míg y tengely mentén ez egyenletes eloszlást jelent, a hengerkoordináta-rendszer miatt sugárirányban négyzetesen növekvőt. Ezt az MCNP alapértelmezésben biztosítja. A kibocsátási energiák a harmadik si kártyán

több részre oszthatók így több atommag emissziós spektrumát tudjuk elkülöníteni. A bomlás atomtípusonkénti valószínűségeit a két radioaktív forrás aktivitási aránya alapján adjuk meg. Mint korábban már szó esett róla, ez úgy kapható, hogy a koncentrációt megszorozzuk a bomlási állandóval. Figyelni kell, hogy a koncentráció mértékegysége ugyanaz legyen – általában különbözőekben szokták megadni a tóriumot és a káliumot (nevezetesen ppm-ben, illetve %-ban). A káliumnak pedig a természetben általános ^{40}K izotópsűrűségét (0,012%) vettük számításba. A 4-es és 5-ös kártyán a kibocsátási spektrumok találhatók. A kálium esetében ez egyetlen vonal, minden fotont ezen az egy (1,46 MeV) energián bocsát ki. A tóriumnál bonyolultabb a kép: bomlási sorral rendelkezik és egy-egy elemnek is több vonala lehet. Ezeknek szakirodalomból is utánajárhatunk, de ki is számíthatjuk őket. Ha ismerjük az egyes elemek bomlási sémáját, megkaphatjuk a bomlási sorra jellemző kibocsátási gamma-spektrumot. Mivel feltételeztük, hogy a bomlási sor tagjai szekuláris egyensúlyi helyzetet értek el, ezért aktivitásuknak egyenlőnek kell lennie. Az egyes energiákra jellemző valószínűségeket az sp4 és sp5 kártyán jelöltük – látható, hogy a kálium egyetlen vonala saját energiaspektrumának 100%-át jelenti, vagyis a valószínűségének értéke 1.

A tally definíciót az f8:p 4 kóddal adtuk meg. Ahogy már korábban említettük, ez a 8-as típusú tallyt (pulse height distribution) jelenti foton funkcióban. A forrást a 4. cellában helyeztük el.

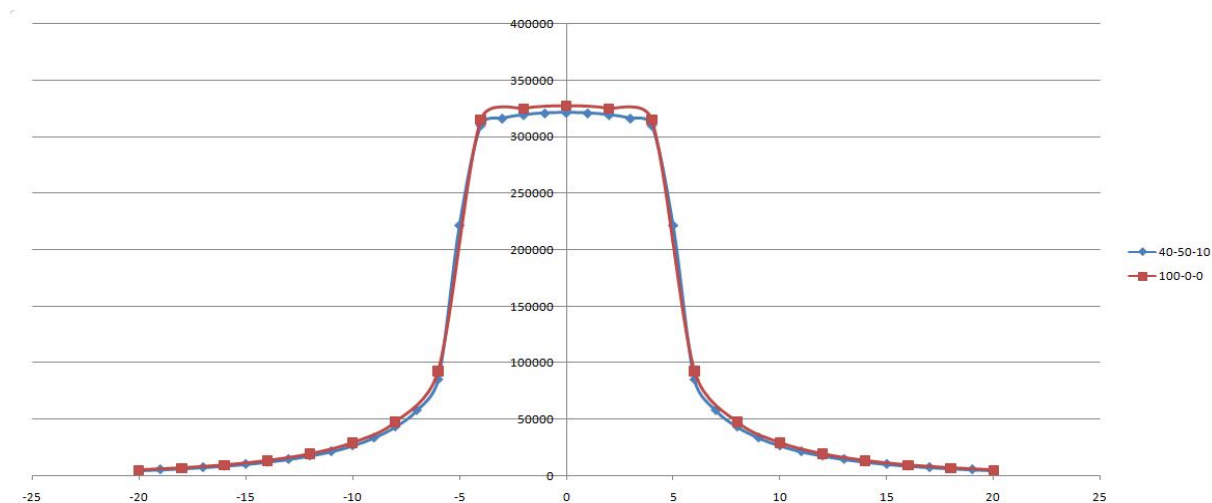
Az e0 a tally energiaablakaira vonatkozik: a beütéseket energia szerint csoportosítva érzékeljük – hasonlóan az SGR mérésekhez, itt azonban csak néhány ablak definiálására van lehetőség – mi a Th 2.62 MeV, ill. a K 1,46 MeV jellemző energiái körül helyeztünk el ablakokat.

Az nps: 1000000 kóddal 1000000 részecskét indítottunk el, ebből a sokaságból igyekszünk a valóságról képet kapni.

3.5. Konkrét mérések, a paraméterek változtatása

Az ábrákon a számok végig l-m-n sorrendben követik egymást, ahol l az illit-, m a montmorillonit-, n a kaolinitásványok arányszámát mutatja az agyagban.

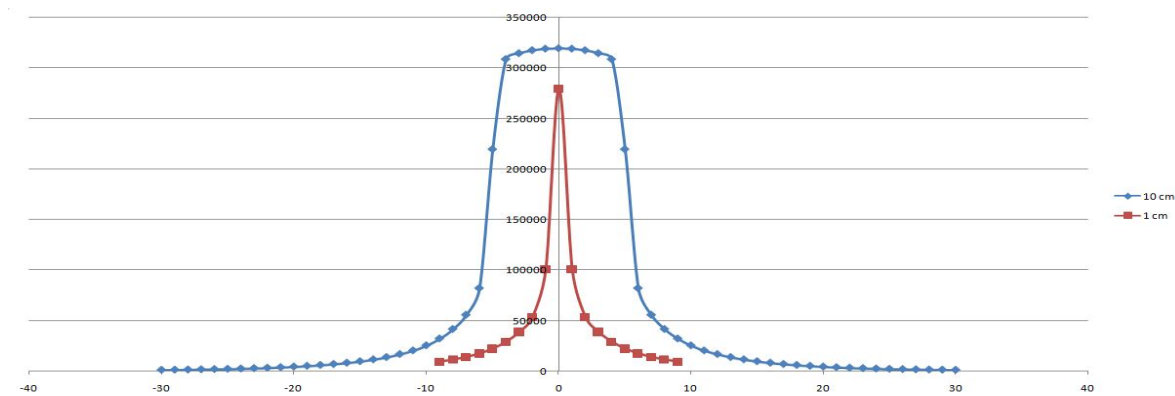
Először nézzünk néhány konkrét példát, majd levonjuk a következtetéseket és összegezzük az egyes geometriai, geológiai, vagy ásványtani különbségek hatásait. A modellezés fejezetben leírtakat legszemléletesebben az ábrák tanulmányozásával vizsgálhatjuk.



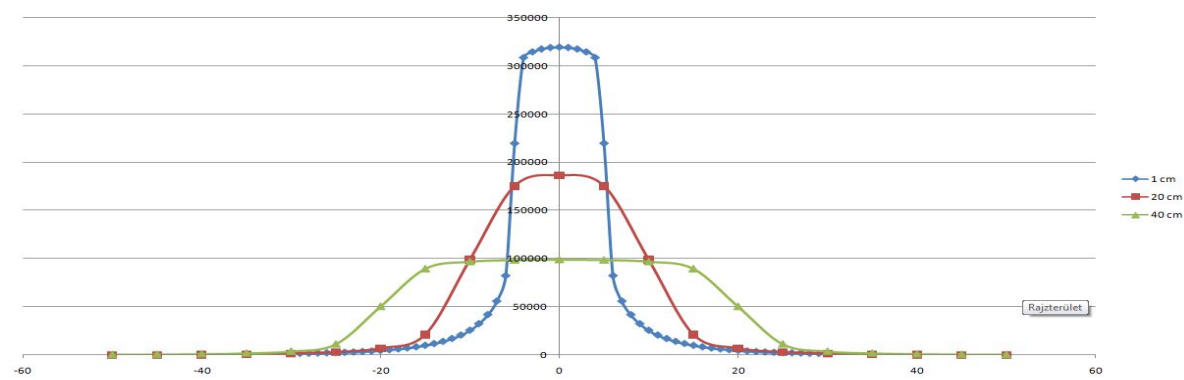
Ábra 12: 40% illit, 50% montmorillonit és 10% kaolinit, illetve 100% illit

A 12. ábrán látható, hogy 100% illit esetén valamivel több beérkezést regisztráltunk, mint montmorillonitot hozzákeverve. A két keverék között fontos különbség, hogy az általános anyagösszetételén kívül eltér a K/Th arányuk is. Ez a mérőszám a mélyfúrési geofizikában fontos szerepet játszik az agyag összetételének meghatározásánál.

A 13. ábrán a szonda hosszának jelalakra gyakorolt hatása látható. Egy kvázi-nullhosszúságú szonda (1 cm) láthatóan sokkal keskenyebb jelet képez, mint egy átlagosnak mondható 10 cm-es, amiből arra következtethetünk, hogy a természetes gamma szelvények alacsony felbontása nyers formában a szonda hosszúságának éppúgy köszönhető, mint az agyagréteg szomszédos tartományba történő átsugárzásának. Természetesen valódi nullhosszúságú szondát modellezni sem tudunk, hiszen ekkor nem tudnánk detektortartományt definiálni.



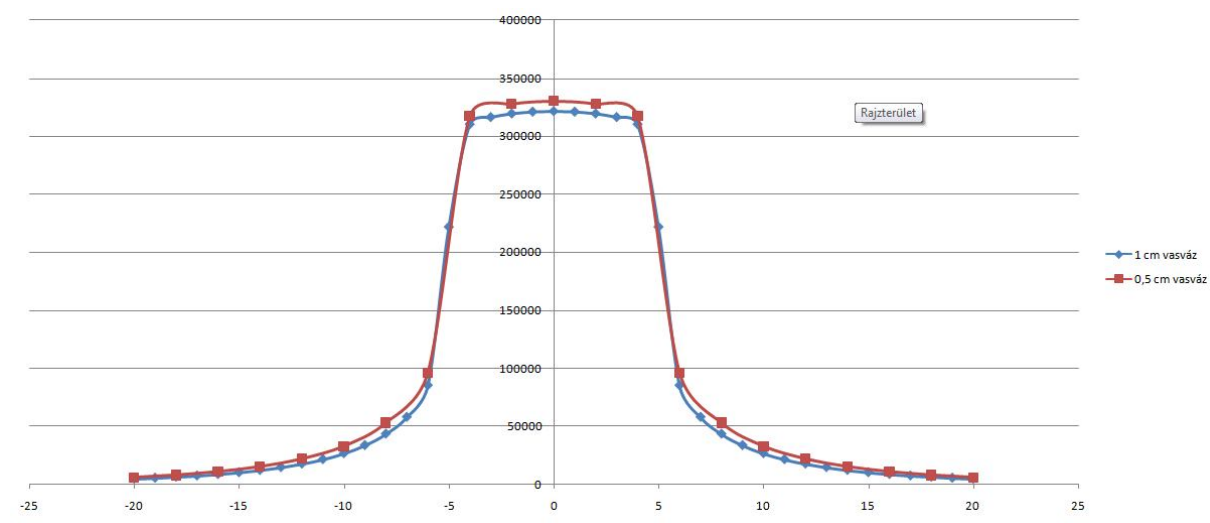
Ábra 13: szonda hosszának hatása (1 cm-es agyagvastagság esetén)



Ábra 14: Agygréteg vastagságának növelése

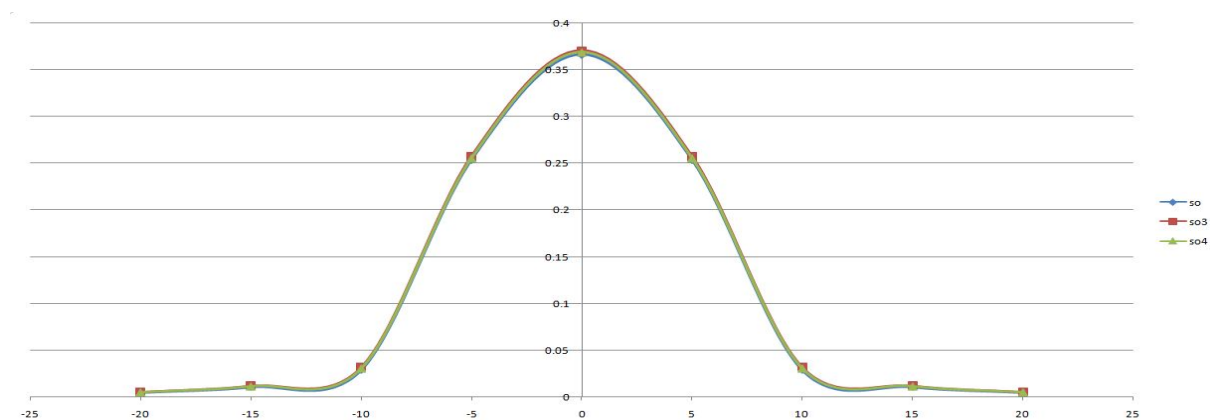
A 14. ábrán látható módon az agygréteg vastagságát variáltuk, nevezetesen ugyanolyan összetétel (10-80-10) esetére végeztünk modellezést 1, 10, 20 és 40 cm-es agygréteg mellett. A különbségek első ránézésre is nyilvánvalóak – ahogy azt vártuk a vastagabb agygréteg szélesebb jelet produkál. További különbség, hogy minél vastagabb réteget tekintünk, annál lankásabb a jel, annál nehezebb kitalálni a valódi réteghatárt. Bár az 1 cm-es esetben viszonylag meredek lefutással van dolgunk, nem gondolhatjuk, hogy ez megfelelő pontosság, hiszen 1 cm-es agygrétegtől az 1 cm széles jelet várjuk el ideális esetben. Megjegyzendő továbbá hogy a vékonyabb agygrétegek nagyobb intenzitású jelet képeznek: Ez pusztán a modellezésből fakadó látszólagos eltérés: mindegyik esetben ugyanannyi fotont bocsátott ki a réteg, a vastag agyagnál ezek nagyobb

térfogatú tartományból indultak, ezért kisebb az aktivitás-sűrűség.



Ábra 15: Vasváz vastagságának változtatása

Egyértelműnek tűnik, hogy ha vastagabb vasváz veszi körül a detektort, akkor kevesebb beérkezést tudunk regisztrálni (15. ábra). Ez annak köszönhető, hogy a vas a fúróiszapnál nagyobb gamma foton elnyelő képességgel rendelkezik. További érdekesség, hogy nemcsak a szonda tíz cm-es sávjában mutatkozik látható eltérés, hanem a jel lefutását követő 10-10 cm-en is. Ez annak tudható be, hogy a detektor minden oldalról képes érzékelni a fotonokat, így a tetején és alján is. Ezeken a részeken pedig szintén kivékonyított vasvázat modelleztünk – tehát nem véletlen, hogy a különbség az előző esetekhez képest lassabban cseng le.



Ábra 16: Porozitás változtatásának hatása. A jelalak előzőektől való eltérése a mintavételezési távolság megváltoztatásának és a mérési pontok között történő interpolációnak a következménye.

A 16. ábrán a vizsgált agyag porozitása a 40%, 60% és 70% között változtatott paraméter - ismét minimális eltérést tapasztalunk. Érdekességként megjegyezzük, hogy ez az ábra a modellezés során végrehajtott mérések ritkasága miatt tér el az előzőektől. Míg korábban 1, illetve 2 cm-enként, ezúttal 5 cm-enként mértünk. Ez azonban a valós mérésekhez képest még mindig sűrűnek számít - gyakori a 10 cm-es mérésköz is. A kérdés szempontjából a mintavételezési sűrűség nem fontos, ugyanis a paraméterváltoztatások hatásai így is jól látszódnak. Ha azonban ezeket a szelvényeket dekonvolúció céljára szeretnénk felhasználni, csökkenteni kellene a mintavételezési távolságot.

4. A dekonvolúció

4.1 A dekonvolúció, mint matematikai fogalom

A konvolúció művelete végezhető függvényeken, és disztribúciókon, de most idősorokkal foglalkozunk, így minket a diszkrét esetre történő értelmezése érdekel, amely a következő:

$$z_k = \sum_i y_i x_{k-i} \quad (2.)$$

A z idősor y és x idősorok konvolúciójaként áll elő. A (2.) egyenlettel ekvivalens jelölés: $y * x = z$. A konvolúció inverz műveletét jelenti a dekonvolúció, amikor ismert z és x sorból állítjuk elő y -t.

Az elemi réteg által keltett jel a rendszer impulzusválasz-függvénye. Ez azt jelenti, hogy ha elemi rétegek összegeként állítjuk elő az agyagrétegeket és rétegsorokat, akkor az ezek által keltett jelek egymásra szuperponálódnak, így jön létre a gamma-szelvény. A gamma sugárzás vertikális profilja az agyagindikáció idősor (amely egyeseket tartalmaz abban a mélységben, ahol agyagot találunk, és nullásokat, ahol nem találunk), és a mintavételező jel (idősor) konvolúciójaként áll elő:

$$v * b + z = m \quad (3.)$$

Ahol $*$ a konvolúciót jelöli. Másképp felírva:

$$m_k = \sum_i b_i v_{k-i} + z \quad (4.)$$

Az m, b, v idősorok a h mélység függvényében, b az impulzusválaszt, v az agyagindikációt, m a mért vagy modellezett gamma idősort, z a zajfolyamatot jelenti. Az agyagindikáció alapján a gamma szelvény előállítása konvolúcióval a probléma direkt feladatát jelenti.

Mi azonban a gamma-profilt mértük, és az agyagindikációt kívánjuk megismerni, ez a probléma inverz feladata, amely megoldásához dekonvolúciót használunk. Mivel az inverz feladat is lineáris rendszerként fogható fel, ennek felírása is történhet konvolúció segítségével

$$mm * c = l \quad (5.)$$

Az mm a mért gamma-idősort, l az agyagindikációt mm-nél jobban közelítő, dekonvolúció utáni, javított szelvény. A dekonvolúció c együtthatói a legkisebb négyzetes keresés módszerével határozhatók meg [S. Senug, 2003, 1. old.]:

$$\frac{\partial (\sum_{i=0}^N v_i - \sum_{k=0}^N m_k c_{i-k})^2}{\partial c_i} = 0 \quad (6.)$$

Tehát a beállított, valódi agyagindikáció és a szűrt szelvény különbségének négyzete legyen minimális. A megoldás a Wiener-Hopf egyenletek segítségével adódik [S. Senug, 2003, 1. old.]

$$\sum_{k=0}^N c_k Cxx_{l-k} = Czx_l \quad (7.)$$

Itt Cxx a bemenet (m) autokovarianciája és Czx az ideális kimenet (v) és a bemenet keresztkovarianciája:

$$Cxx_i = \frac{\sum_{k=0}^{N-n} (m_k - \bar{m})(m_{k+i} - \bar{m})}{N} \quad (8.)$$

$$Czx_i = \frac{\sum_{k=0}^{N-n} (m_k - \bar{m})(v_{k+i} - \bar{v})}{N} \quad (9.)$$

Az $\bar{m}$ az m, a $\bar{v}$ a v idősor átlagát jelöli, N a mérések száma.

A (7.) N tagból álló lineáris egyenletrendszert megoldva N db c_k ismeretlenre megkapjuk a dekonvolúció együtthatóit, amelyeket (5.)-ba helyettesítve, bármely m idősor agyagindikációját közelíthetjük.

4.2 A program szerkezete

A dekonvolúciót végző programot Mathcadben írtuk. Egy ilyen programnak képesnek kell lennie az együtthatósor számítására (7.) megoldásával, és (5.) elvégzésére bármilyen megadott gamma-szelvény esetén. Az impulzusválasz-idősort a programban mmo-val jelöltük.

Az együtthatóvektort az elrendezés közepén elhelyezett elemi réteg agyagindikációjával és az ez alapján modellezett gamma-szelvény felhasználásával határoztuk meg. Az agyagindikáció időszora 0 értéket vesz fel minden modellezési pontban, ahol nincsen agyag, és 1-et azon egyetlen pontban (a szelvény közepén), ahol ténylegesen agyag van a szonda mellett. Természetesen többféle modellezett válasz idősort alkalmazhatunk, azok közül választhatunk, amelyek a modellezési valóság különböző beállításai mellett mértünk, illetve a különböző felbontású modellek között válogathatunk - a legjellemzőbbnek tekintett paraméterekkel modellezett válaszfüggvényt adtuk meg a programnak. A mintavételi távolságot érdemes az alapján megválasztani, hogy milyen maximális felbontóképességet érhetünk el a mért gamma-szelvény segítségével. A programban lehetőség nyílik az idősorok konstans értékekkel való szorzására. Ezt azért tehetjük meg, mert minden egyes képlet, amit használunk, lineáris viselkedésű, azaz a bemenetet konstanssal szorozva a kimenet is ugyanazzal a számmal szorzódik. Ezt akkor is kihasználjuk, amikor a kimenetet és a bemenetet azonos skálán ábrázoljuk.

Az m idősor autokovarianciáját és az agyagindikációval vett keresztkovarianciáját a Mathcad beépített „covar(vektor1, vektor2)” két vektorváltozós, vektor kimenetű függvénye segítségével számítjuk ki. Ekkor a (7.) egyenletrendszerben szereplő autokovariancia invertálására van szükség. A $Cxx_{l-k} = CXX_{l,k}$ megadással egy Toeplitz-típusú sávmátrixhoz jutunk. Ez a Cxx

vektorok egymás alatti elcsúsztatásával adódik, a (17.) ábrán látható algoritmussal adtuk meg:

$$CXX_{k,i} := \begin{cases} CXX_{k,i} \leftarrow Cxx_{i-k} & \text{if } i - k > 0 \\ CXX_{k,i} \leftarrow Cxx_{(k-i)} & \text{otherwise} \\ CXX_{k,i} \end{cases}$$

Ábra 17: A sávmátrix-előállító algoritmus a Mathcadben

Az algoritmus szimmetrikus mátrixot definiál, amely a (18.) ábrán látható:

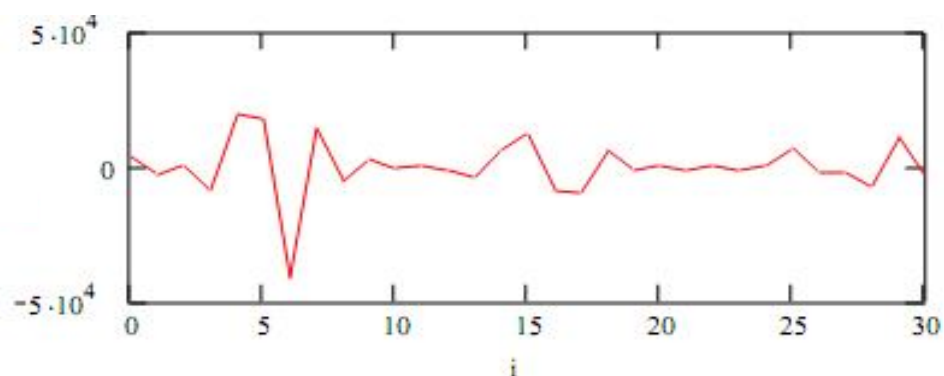
$$\begin{matrix} Cxx_0 & Cxx_1 & Cxx_2 & Cxx_3 & \dots & Cxx_{I/2} \\ Cxx_1 & Cxx_0 & Cxx_1 & Cxx_2 & \dots & Cxx_{I/2-1} \\ Cxx_2 & Cxx_1 & Cxx_0 & Cxx_1 & \dots & Cxx_{I/2-2} \\ Cxx_3 & Cxx_2 & Cxx_1 & Cxx_0 & \dots & Cxx_{I/2-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cxx_{I/2} & Cxx_{I/2-1} & Cxx_{I/2-2} & Cxx_{I/2-3} & \dots & Cxx_0 \end{matrix}$$

Ábra 18: CXX mátrix előállítása a Cxx vektorból

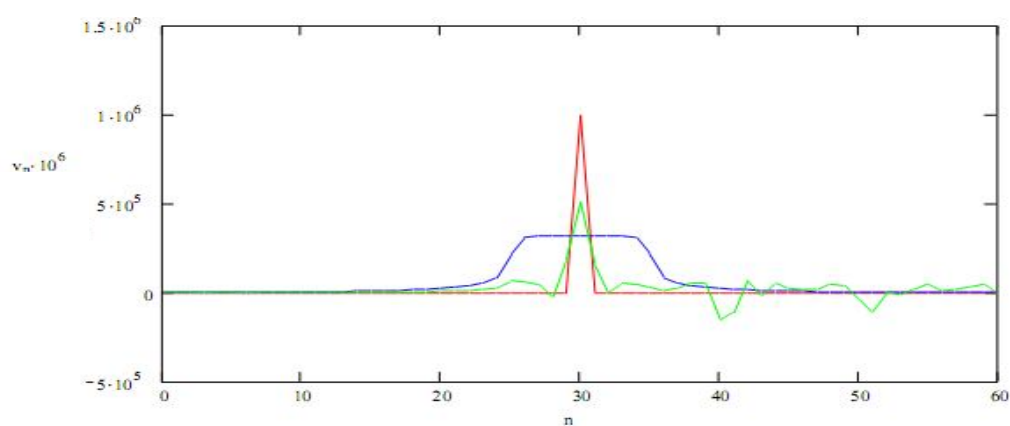
A szimmetrikussá tétel elvégezhető, mert az autokovariancia valójában szimmetrikus idősor ((6.) –ban k -N-től N-ig fut), de a beépített függvény azonos indexeléstől ((8.) –ban i=0-tól) számol, így a kovariancia elveszti szimmetrikus jellegét.

(7.)-ből látható, hogy CXX mátrix inverzét Czx idősorral szorozva megkapjuk a c együtthatósort. Mivel az Cxx és Czx vektorokat úgy indexeltük, hogy a hosszúságuk az mmo hosszának (l) a felével egyezzen meg (mert a kovariancia-számító beépített algoritmus nem szimmetrikus kovarianciát számol) a CXX mátrix is $I/2 \times I/2$ méretű, így a vektor és a mátrix egymással szorozhatók és a c együtthatósor is $I/2$ hosszúságú.

A dekonvolúciót először az mmo idősorra számítottuk, amelynek szűrt változata saját magánál közelebb kell, hogy essen a v agyagindikációhoz, ami vékony agyagréteg esetén egy „tüske”.



Ábra 19: A dekonvolúció együtthatói l=30 esetén



Ábra 20: A túske helyreállítása az impulzusválaszon végzett dekonvolúció által. Piros: az eredeti agyagindikáció túske, kék: a modellezett gamma-szelvény, zöld: a dekonvolvált gamma-szelvény. A vízszintes tengely felirata cm-ben értendő, a függőleges tengelyen a foton beérkezésszámok láthatók egymillió foton közül.

C-vel konvolválva bármely, v-vel és mmo-val azonos mintavételi közzel létrehozott mért (lehetne akár modellezett is) gamma-idősort, annak szűrt változatát, l-et kapjuk (3.). Problémát jelenthet, ha a modellezés és a mérés mintavételi távolsága eltérő. Mivel minden esetben nagyobb a mérési mintavételi köz, mint a modellezésé (hiszen a felbontást szeretnénk javítani), a mért adatok interpolációjára van szükség. Lineáris interpolációt alkalmaztunk, a következő képlettel végeztük a Mathcadben:

$$m_{i_{k \cdot H + n}} := m_{r_k} + \frac{(m_{r_{k+1}} - m_{r_k}) \cdot n}{H} \quad (10.)$$

Itt K a mért idősor dimenziója, k fut 0 -tól $K-2$ -ig, H a mérési és modellezési mintavételi távolság hossza, az n index 0 -tól $H-1$ -ig fut, a „mer” az interpolálatlan, az „mi” az interpoláció utáni mért idősor. Az „mi” mintavételi távolsága így megegyezik a modell mintavételi távolságával, így az immár dekonvolválható.

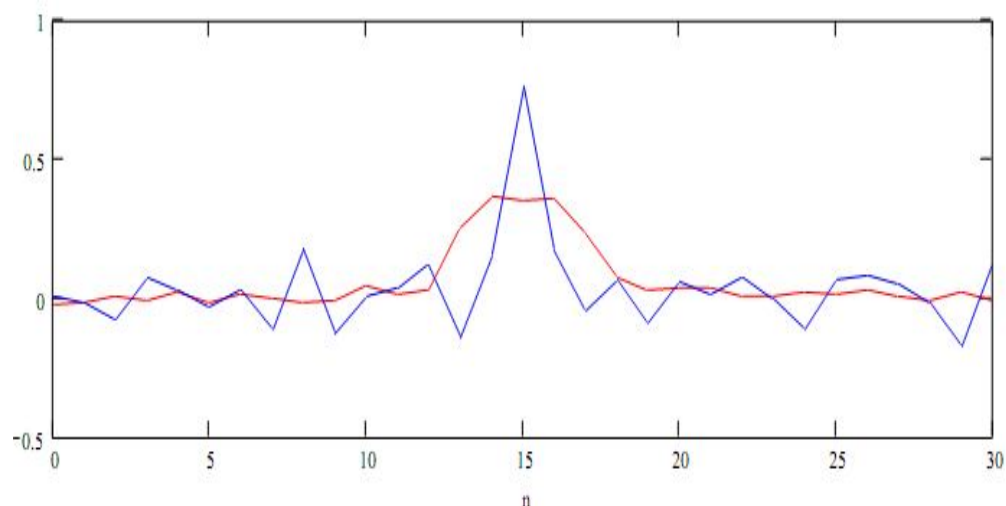
A dekonvolúciót elvégeztük az mmo-hoz hozzáadott zaj (egyenletesen elosztott véletlen számok) felhasználásával is (21. ábra). A zaj nagyságát itt a jelének nyolcadrészeként adtuk meg. Ugyan a dekonvolúció káros hatásként kiemelte a zajt a jelmentes szakaszokon, a szükséges feladatot most is elvégezte: a görbe meredekebb lefutásúvá vált és összehúzódott.

Az eljárást teszteltük az eddiginél vastagabb, modellezett rétegekkel is. (22. ábra) Az eredmény szembeötlő: az új szelvénynek a rétegátmenetnél az eddigi gamma-mérésnél tapasztaltnál képest sokkal meredekebb a lefutása, azaz sokkal nagyobb pontossággal kijelölhetők az agyagréteg határai. A konstans értékekkel történő szorzást - a korábban leírtak alapján - az azonos skálán való ábrázolhatóság miatt alkalmaztuk.

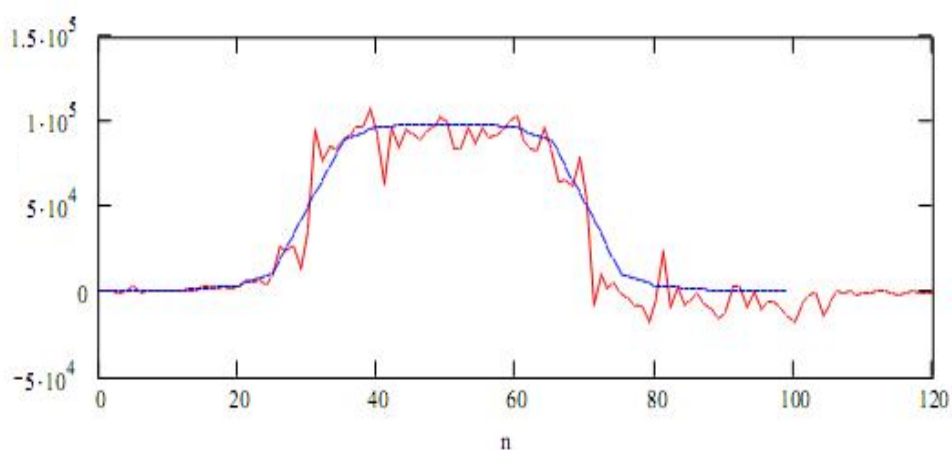
A modellezett szelvényeken végzett dekonvolúció után az is kiderült, hogy jelentős nagyfrekvenciás zajjal terheltté váltak a kimeneti szelvények még zajtalan bemenet esetén is. Ebből levonható az a tanulság, hogy a kimenet valódi felbontása kisebb, mint a modellezett impulzusválasz elméleti felbontása (amely jelen esetben 1 cm), tehát nem jelez a görbe minden csúcsa jelenlévő agyagot, és minden alacsonyabb értéke kis sugárzású kőzetet, ezek csupán a dekonvolúció által keltett zaj hatásai. Később, a mért szelvények felbontásának vizsgálatánál ez fontos szerepet játszott abban, hogy nagyobb mintavételezési távolságú ($2,5\text{ cm}$) modellezett impulzusválasz-függvénnyel dolgoztunk, azaz csak 1 cm -esnél kisebb felbontást tudtunk elérni a szűrés után.

Ha használjuk a programot, a mért bemenő számsort (mivel az API egységek arányosak a modellezett foton beérkezésszámokkal, ezeket API egységekben is meg lehet adni) a „mer” vektorba kell beírni. Meg kell adni ennek dimenzióját (abból 1 -et kivonva K -ként) és ennek mintavételi távolságát cm -ben (dxk -ként). Ha a modellezett impulzusválasz-függvényt is meg akarjuk változtatni a korábbihoz

képest eltérő geológiai, technológiai feltételek miatt, akkor a modellezett számsort (mmo), annak dimenzióját (abból egyet kivonva l-ként) és mintavételezési távolságát cm-ben (dxn) is meg kell adni. Az ideális kimenet agyagindikációt ekkor a program automatikusan megadja egy l dimenziójú idősorként. Ennek értéke l/2-ben 1, mindenhol máshol 0.



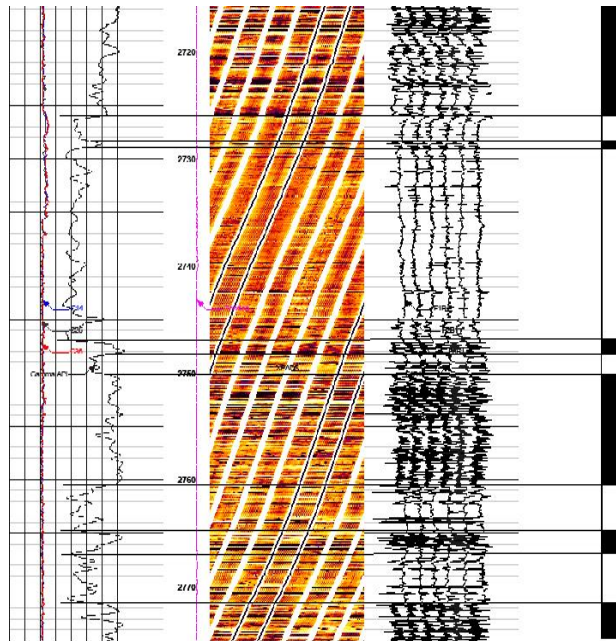
Ábra 21: A zajos impulzusválaszok dekonvolúciója. A vízszintes tengely feliratai cm-ben értendők, a függőleges tengelyen a foton beérkezésszámok láthatók egymillió foton közül. A piros a zajos modell szelvényét, a kék ennek szűrt változatát jelöli.



Ábra 22: 40 cm vastag agyagréteg a dekonvolúció előtt és után. Pirossal a kimenetet, késsel a bemenetet jelöljük. A vízszintes tengely feliratai cm-ben értendők, a függőleges tengelyen a foton beérkezésszámok láthatók egymillió foton közül.

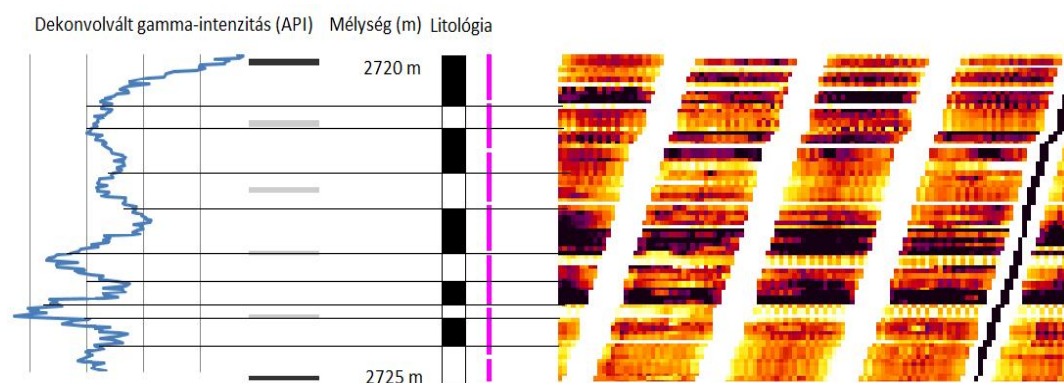
5. A módszer alkalmazása valódi gamma-mérésekre

A célunk az, hogy a geológiai valóság minél pontosabb meghatározását biztosítsuk azért, hogy pontos becslést adhassunk a potenciális tározórétegek kiterjedtségéről. A gyakorlatban erre az ún. FMI (FMI Fullbore Formation MicroImager) szelvényezést használják, amivel akár 0,5 cm vastagságú rétegek is kimutathatók. A módszer elektromos eljárásan alapul, elsődleges alkalmazása éppen a készletbecslés, illetve a geológiai struktúrák nagyfelbontású megjelenítése. Egy ilyen szelvény látható a 23. ábrán. A színes kép 360 fokos áttekintést nyújt a fúrólukról, az átlósan húzódó fehér vonalakat a műszer karjai okozzák. A színskála az elektromos ellenállás szerinti különbségeket jelenti, a sötétebb a kisebb, a világosabb a nagyobb ellenállásra utal. Jól láthatók a kisebb ellenállású, vékony agyaglaminációk, amelyek sűrűn követik egymást megnehezítve ezzel más módszerek pontos működését – jelen dolgozat célja éppen a TG mérés adatainak pontosítása, elérendő tehát, hogy az eredmény minél inkább közelítse az FMI által nyújtott felbontást.



Ábra 23: FMI szelvény – A színskála az elektromos ellenállást jelzi. Jobb oldalon a nyers TG (bal oldal) alapján kijelölt agyagrétegek

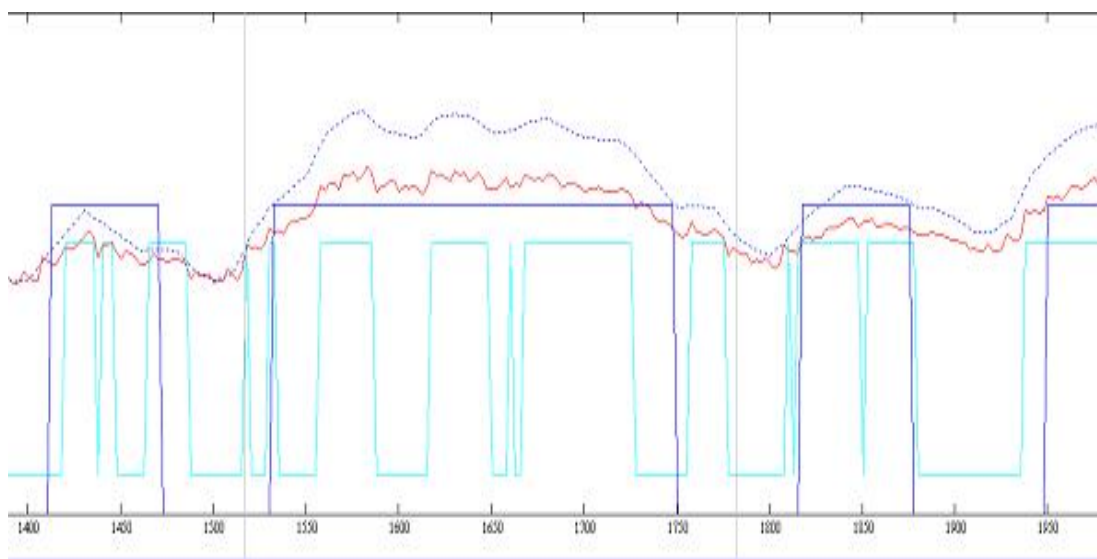
Tekintsük erre a konkrét példára a korábban leírt módszert. A nyers adatsor 10 cm-enkénti mérések eredményeiből tevődik össze. Az alkalmazandó dekonvolúciós együttható-sorozat egy új MCNP modellezés alapján 2,5 cm-es felbontással készítettük el. 50% - 50%-ban montmorillonitból és illitből álló, 60% porozitású, $2,55 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű, 2,5 cm vastag agyagréteget; 20% porozitású, kvarckristályokból álló, az agyagréteg felett és alatt található homokkőréteget; átlagos összetételű (2. ábra), $1,3 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű fúróiszapot; és fél cm vastag vasvázat adtunk meg az MCNP programnak. Mivel a mérési adatsor 10 cm-es felbontású, azt interpolálni kellett a 4. fejezetben tárgyalt okok miatt - ebben a példában is lineáris interpolációt alkalmaztunk. Ezt követően a már bemutatott eljárást hajtottuk végre (Wiener szűrő) – a Wiener-Hopf egyenletekből (7.) meghatároztuk a szűrő együtthatóit, majd a dekonvolúció elvégzése után egy kész szelvényhez jutottunk amit összevethetünk az eredeti mért értékek által jelzett görbével. Ezt láthatjuk a 24. ábrán.



Ábra 24: A dekonvolált TG szelvény és az FMI kép egy részletének összevetése (ez a szakasz a nyers TG alapján teljesen agyagnak minősül)

Hagyományosan a jelalak fel- és lefutásának inflexiós pontjára húzzák a réteghatárok feltételezett helyét, ezért a meredekség növelése kívánatos, hiszen így kisebb hibát véthetünk. Az ábrákon jól látszik, hogy ez az eredeti jelsorozathoz képest teljesült, vagyis egyrészt meredekebb, „tüskeszerűbb” jeleket kaptunk, másrészt olyan vékony agyag-indikációk is megjelentek, amelyek az első vizsgálat alapján az egybemosódás miatt nem látszóttak. Sikerült pontosabb becslést adni a tározókapacitásra is, amit a 25. ábra is alátámaszt. A mérési és feldolgozott

eredmények összevetéséből adódik, hogy az összes agyagvastagság a szelvény mentén az eredeti érték 80%-ára csökkent, vagyis a TG mérés során jóslt szelvénymenti kb. 50% agyag 40%-ra módosult. A szelvény 4890 m hosszú, ebből adódik, hogy a korrekció további 400 m nem agyagos kőzetet feltételez – a porozitás ismeretében ebből egyszerűen adható szénhidrogén-tartalomra vonatkozó becslés. Ez igen jelentős eltérést mutat a két készlet között (20%-os), sok esetben ekkora különbség a termelési projekt leállításához is elég.



Ábra 25: A dekonvolált jelsorozat egy szelete. A kék pontozás az eredeti, a piros vonal a dekonvolált szelvényt, a folytonos kék az előbbi, a világoskék az utóbbi alapján meghatározott agyagrétegek elhelyezkedését jelöli. A vízszintes tengelyen a számok a mélységet jelölik és cm-ben vannak megadva, a függőlegesen relatív intenzitásskála látható.

6. Javaslatok

Eredményeink alapján azt mondhatjuk, hogy a gamma-mérések adatait dekonvolúcióval pontosítva bár a valóságot az eredeti szelvélynél jobban megközelítő jelalakot kaptunk, az elektromos módszeren alapuló mérés pontossága egyelőre nem érhető el. Az általunk használt eljárás során többször használtunk közelítéseket, interpolációt, illetve a hiba minimalizálását ugyan előírtuk, ez összességében nem adhat olyan pontosságú eredményt, ami alapján biztonsággal meg lehetne határozni egy fúróluk környezetének geológiáját kizárólag gamma-mérésekre támaszkodva.

Elmondható, hogy a dekonvolúcióval sikerült nagymértékben javítani a gamma-szelvényezés pontosságán, de az eljárás további javítása is elképzelhető. Most ezeket a pontokat tekintjük át.

A bemenő adatok kiegészítésénél lineáris interpolációt használtunk, ami ugyan számolásigényét tekintve sokkal alkalmasabb más módszereknél, a pontossága nem feltétlenül elégséges. Interpolációra azért van szükség, mert a terepi mérés során nem használnak egy bizonyos szintnél kisebb mintavételi távot. Ez azonban a 2. fejezetben leírtak miatt nem minden esetben javítható tovább, tehát a továbbiakban mindenképpen a feldolgozási lépések finomítása az elsődleges cél.

Az inputok összeállításánál szinte minden lépés valamilyen idealizáció eredménye – ezen hibák azonban a dekonvolúciós eljárás szempontjából közel irrelevánsak, valójában csak a jelalak minimális változását eredményezhetik (vessük össze a 3. fejezetben található jelalak-összehasonlításokkal) – tehát a modellezéssel nem követünk el végzetes hibát, ennek ellenére a fúróiszap radioaktív hatásának figyelembevétele kívánatosnak mutatkozik.

A pontosságot nem befolyásolja, de a futási időn nagyban lehet javítani, ha a bemenő jel autokovariancia-mátrixából Levinson algoritmussal nyerjük a dekonvolúció együtthatóit – ezzel a lépéssel kikerülhető lenne a (nagy adathalmazok esetén) rendkívül időigényes mátrixinvertálás.

A mérés során használt mintavételi távolságnál a modellezés során kisebb értékekkel dolgoztunk. Ilyen esetekben az általános eljárás az interpoláció, vagyis az adathiány megszüntetése a meglévő adatok felhasználásával. Adódik azonban egy probléma: vékonyabb agyagrétegeket szeretnénk kimutatni, mint amilyen a mintavételi távolság. Tehát információt veszítettünk a mintavétellel, aminek visszanyerésére interpolációval nincs lehetőség.

Összegzésképpen elmondhatjuk, hogy a Monte Carlo modellezés során megszerzett információt felhasználtunk egy, a gamma-szelvények dekonvolúciójára, ezáltal az agyag-homok réteghatár-átmenetek pontosabb meghatározására

alkalmas eljárás létrehozásához. Az algoritmust valódi fúrólyukban mért gamma-szelvényen elvégezve a kimeneti adatsor 20%-kal több szénhidrogén-tartalmat jelzett, mint a nyers szelvény.

Irodalomjegyzék

Internetes jegyzetek:

MCNP – A General Monte Carlo N – Particle Transport Code Version 4B, Edited by:
Judith F. Briesmeister, 1997. March

Paul Glover: Petrophysics Msc Course Notes

Sebastian Senug: Wiener-Hopf equations. Convolution and correlation in
continuous time, 2003. February

Sturz, Anne; Itoh, Mika; Smith, Susan: Mineralogy and Chemical Compositioion of
Clay Minerals, Tag Hydrothermal Mound in: Proceedings of the Ocean Drilling
Program, Scientific Results, 277-284, edited by: Herzig, P. M., Humphris, S. E., Miller,
P. J., Zierenberg, R. A., 1998

Drilling Fluids Composition and use within the UK Offshore Drilling Industry;
Offshore Technology Report – OTO 1999 089, prepared by Health and Safety
Laboratory, 1999.

Ábrajegyzék

Ábra 1: agyagréteg átsugárzása a nem agyagos szakaszra.....	4
Ábra 2: Átlagos fúróiszap összetétele az Egyesült Királyság tengeri fúrási gyakorlatában. (Drilling Fluids Composition and use within the UK Offshore Technology, 2000, 8. old.)	7
Ábra 3: A kálium, a tórium-sorozat és az urán-sorozat gamma-emissziós spektruma	9
Ábra 4: az egyes gamma energiákra jellemző jelenségek	10
Ábra 5: a beérkezési gamma-spektumon jól kivehetők a kálium, tórium, illetve urán jellemző vonalai.....	11
Ábra 6: Agyagásványok Th/K aránya.....	12
Ábra 7: A gamma szelvények alakja és az üledékképződési környezetek közötti kapcsolat..	14
Ábra 8: egy neutron életútja az MCNP modellezés során.....	17
Ábra 9: Tally típusok.....	212
Ábra 10: az input szerkezete.....	223
Ábra 11: egy jellemző input, amellyel dolgoztunk.....	26
Ábra 12: 40% illit, 50% montmorillonit és 10% kaolinit, illetve 100% illit.....	29
Ábra 13: szonda hosszának hatása (1 cm-es agyagvastagság esetén).....	30
Ábra 14: Agyagréteg vastagságának növelése.....	30
Ábra 15: Vasváz vastagságának változtatása.....	31
Ábra 16: Porozitás változtatásának hatása. A jelalak előzőektől való eltérése a mintavételezési távolság megváltoztatásának és a mérési pontok között történő interpolációnak a következménye.	31
Ábra 17: A sávmátrix-előállító algoritmus a Mathcadben.....	35
Ábra 18: CXX mátrix előállítása a Cxx vektorból	35
Ábra 19: A dekonvolúció együtthatói $l=30$ esetén.....	36
Ábra 20: A túske helyreállítása az impulzusválaszon végzett dekonvolúció által. Piros: az eredeti agyagindikáció túske, kék: a modellezett gamma-szelvény, zöld: a dekonvolált gamma-szelvény. A vízszintes tengely feliratai cm-ben értendők, a függőleges tengelyen a foton beérkezésszámok láthatók egymillió foton közül.....	36
Ábra 21: A zajos impulzusválaszok dekonvolúciója. A vízszintes tengely feliratai cm-ben értendők, a függőleges tengelyen a foton beérkezésszámok láthatók egymillió foton közül. A piros a zajos modell szelvényt, a kék ennek szűrt változatát jelöli.....	38

Ábra 22: 40 cm vastag agyagréteg a dekonvolúció előtt és után. Pirossal a kimenetet, kékkel a bemenetet jelöljük. A vízszintes tengely felirata cm-ben értendő, a függőleges tengelyen a foton beérkezésszámok láthatók egymillió foton közül.	388
Ábra 23: FMI szelvény – A színskála az elektromos ellenállást jelzi. Jobb oldalon a nyers TG (bal oldal) alapján kijelölt agyagrétegek.....	38
Ábra 24: A dekonvolvált TG szelvény és az FMI kép egy részletének összevetése (ez a szakasz a nyers TG alapján teljesen agyagnak minősül).....	400
Ábra 25: A dekonvolvált jelsorozat egy szelete. A kék pontozás az eredeti, a piros vonal a dekonvolvált szelvényt, a folytonos kék az előbbi, a világoskék az utóbbi alapján meghatározott agyagrétegek elhelyezkedését jelöli. A vízszintes tengelyen a számok a mélységet jelölik és cm-ben vannak megadva, a függőlegesen relatív intenzitásskála látható.	411

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket szeretnénk kifejezni témavezetőnknek, Dr. Balázs Lászlónak, aki útmutatásával és hasznos tanácsaival hozzájárult dolgozatunk létrejöttéhez.

Köszönjük az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék dolgozóinak érdeklődésüket valamint észrevételeiket, amelyeket a kari TDK konferencián és egyéb beszélgetésekkor tettek.

Továbbá köszönjük családjainknak segítő türelmüket.