

A BME oktatóreaktor CFUL08 detektorra vonatkozó átviteli függvényének számítása

Horváth Márton, MSc. II. évf.

Konzulens: Dr. Fehér Sándor, BME Nukleáris Technikai Tanszék

Budapest

2013. október

Tartalomjegyzék

TARTALOMJEGYZÉK	2
1. BEVEZETÉS.....	3
2. ELMÉLETI ÖSSZEFOGLALÁS	4
2.1. SÚLYFÜGGVÉNY	4
2.2. SÚLYFÜGGVÉNY-SZÁMÍTÁS A PAKSI ATOMERŐMŰ ZÓNÁJÁRA	4
2.3. A BME OKTATÓREAKTORRA TÖRTÉNŐ SÚLYFÜGGVÉNY-SZÁMÍTÁS CÉLJA	5
2.4. AZ MCNP PROGRAM	5
2.5. A CFUL08 NEUTRONDETEKTOR	6
3. AZ MCNP-INPUT.....	8
3.1. GEOMETRIA ÉS TÉRBELI FONTOSSÁGI MEGFONTOLÁSOK	8
3.2. FORRÁS	11
3.3. SZÁMÍTÁSI CÉLFÜGGVÉNYEK (TALLY-K).....	12
4. AZ MCNP PROGRAMMAL VÉGZETT SZÁMÍTÁSOK EREDMÉNYEI.....	13
4.1. A SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEKÉPP KAPOTT PÁLCAZISED SÚLYOK	13
4.2. AZ EREDMÉNYEK BIZONYTALANSÁGA	14
5. SÚLYFÜGGVÉNY.....	16
5.1. AZ ILLESZTETT FÜGGVÉNY ALAKJA	16
5.1.1. FÜGGŐLEGES ILLESZTÉS.....	16
5.1.2. SÍKBELI ILLESZTÉS.....	18
5.2. AZ EREDETI ÉS ILLESZTETT ÉRTÉKEK EGYBEVETÉSE	19
6. KONKLÚZIÓ.....	22
6.1. AZ ELÉRT EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA.....	22
6.2. KITEKINTÉS	23
7. HIVATKOZÁSOK.....	24

1. Bevezetés

A Paksi Atomerőműben ex-core neutrondetektoroként használt CFUL08 típusú hasadási kamrák impulzus- és áramüzemmódra egyaránt képesek, de a jelenleg alkalmazott elektronika csak az impulzusüzemmodot támogatja. Az üzemi tartomány kiterjesztésére (azaz az impulzus- és áramtartomány teljes kihasználásra) a REGTRON cég készít új előerősítőt és feldolgozó elektronikát. Az elektronika tesztelése atomerőművi körülmények között nehezen valósítható meg, ezért felvetődött, hogy az új eszköz üzembevétele előtti bevizsgálására a BME oktatóreaktorában kerüljön sor.

A tesztelés egyrészt stacioner teljesítmény, másrészt dinamikus teljesítményváltozások melletti méréseket jelentene. A stacioner fluxusnak a detektor helyén történő meghatározása viszonylag egyszerű feladat. Ha azonban időben változó fluxus esetén is tesztelni kívánjuk a detektorjelet feldolgozó elektronikát, a mérés modellezésekor figyelembe kell venni a reaktortérbeli fluxuseloszlásának időbeli módosulását is. Ahhoz, hogy egymástól lényegesen eltérő időbeli lefutású transziensekre is el tudjuk végezni a tesztelést, célszerű a reaktornak a CFUL08 detektorra vonatkozó olyan átviteli függvényét (más elnevezéssel: súlyfüggvényét) meghatározni, amely minden egyes pálcátizedre megadja az ott keletkező hasadási neutronoktól származó, normalizált detektor-válaszjelet. (Esetünkben az átviteli függvény értéke egyenlő az adott pálcátizedben keletkezett egy hasadási neutron által a detektorban kiváltott beütésszámmal, illetve annak statisztikai átlagával.)

A TDK munkám célja ennek az átviteli függvénynek meghatározása volt. Tekintettel arra, hogy az oktatóreaktor aktív zónája és annak közvetlen környezete – elsősorban a különféle besugárzó csatornák és a besugárzó alagút miatt – jelentős irregularitásokat mutat, a szóba jöhető neutrontranszport-számítási módszerek közül a Monte Carlo módszer használata tűnt célravezetőnek. Ez a módszer ugyanis bonyolult geometriai elrendezések esetén is kompromisszumok nélküli modellezést tesz lehetővé. Hátránya azonban a meglehetősen nagy számításigény. Ezért az átviteli függvény meghatározásához csak a pálcátizedek egy részére számítottam ki azok tényleges súlyát, a többi pálcátizedre vonatkozó súlyt a kiszámított értékekre történő analitikus függvényillesztéssel állítottam elő. A neutrontranszport-számításokhoz az MCNPX programot használtam. A dolgozat elsősorban az MCNPX-szel történő modellezés technikáját, a transzport-számításba bevont pálcátizedek kiválasztásának szempontjait és az illesztéshez használt analitikus függvényrel kapcsolatos reaktorfizikai megfontolásokat mutatja be.

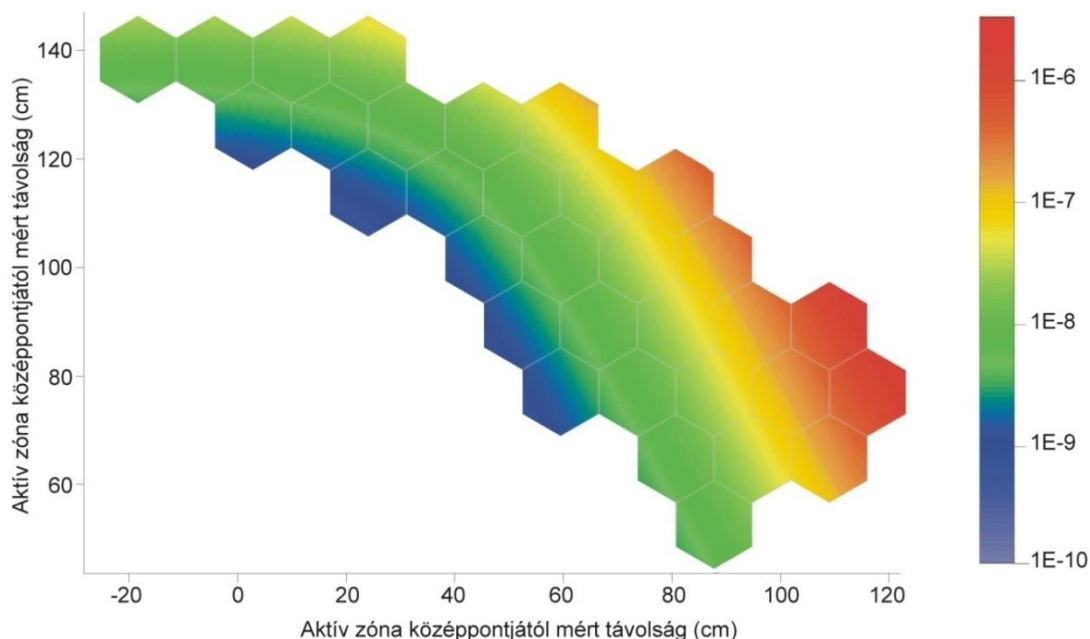
2. Elméleti összefoglalás

2.1. Súlyfüggvény

Mivel a paksi atomerőmű reaktorainak teljesítményszabályozása részben a reaktortartályon kívül elhelyezkedő úgynevezett ex-core neutrontetektorok jelén alapul, az ex-core detektorok által szolgáltatott impulzus- és/vagy áramjelek értelmezése különösen fontos a biztonság üzemvitel szempontjából. Az értelmezéshez szükség van annak ismeretére, hogy a detektorba jutó neutronok mely pályákból indultak. A reaktorban keletkező hasadási neutronok és az ex-core detektor által adott válaszjel kapcsolatának leírására vezették be a súlyfüggvény fogalmát. Munkám során a súlyfüggvényt a következő definícióval értelmeztem: az a függvény, mely megadja, hogy a reaktor egy térfogati egységében (vizsgálataim esetében pálcatedben) Watt-spektrummal keletkező egy darab hasadási neutron mekkora jelet (átlagos beütésszámot) vált ki a detektorban. Ennek ismeretében meghatározható, hogy a vizsgált ex-core detektor a reaktor adott, kisebb vagy nagyobb kiterjedésű térrészből származó neutronok hatására milyen „erősségű” válaszjelet ad, illetve hogy a detektor milyen mélyen „lát bele” a reaktor aktív zónájába.

2.2. Súlyfüggvény-számítás a Paksi Atomerőmű zónájára

Az általam végzett vizsgálatokhoz hasonló fejlesztésre került sor 2002-ben az NTI-ben is, amelynek során a paksi atomerőmű reaktorainak KNK-4 típusú detektorokra vonatkozó súlyfüggvényét határozták meg [1]. A dolgozatomban leírt munka azonban ettől jelentősen különbözik mind a reaktor és a detektor geometriáját, mind méreteit, mind az anyagi összetételt tekintve. A 2002. évi munka eredményeit ismerve megállapítható, hogy a vizsgált KNK-4 típusú ex-core neutrontetektorok csak néhány kazetta mélységig „látnak be” a zónába, a belső pályákból induló neutronok 4 nagyságrenddel kisebb valószínűséggel váltanak ki detektorjelet, mint a zóna szélén elhelyezkedő kazettákból induló neutronok.



1. ábra: A paksi zónára illesztett súlyfüggvény [1]

A fentiek alapján kijelenthető, hogy a paksi atomerőmű reaktorainak teljesítményszabályzását főleg a detektorhoz legközelebbi 3 kazettaréteg alapján végzik. A reaktor belsejében végbemenő lokális folyamatokról az excore detektorok jele nem ad tájékoztatást. Ezen a folyamatok monitorozására a zónában elhelyezkedő SPND (Self Powered Neutron Detector) adnak lehetőséget, melyek válaszüzeje azonban jelentősen lassabb, mint az ex-core detektorként használt KNK-4, illetve CFUL08 detektoroknak.

2.3. A BME oktatóreaktorra történő súlyfüggvény-számítás célja

TDK munkám a paksi atomerőműben használt CFUL08 típusú neutrondetektorok újonnan kifejlesztett elektronikájának teszteléséhez, hitelesítéséhez kapcsolódik, és egyben része lesz a diplomamunkámnak [2]. A hitelesítő méréseket az NTI reaktorában tervezzük elvégezni stationer és időben változó neutronterek segítségével. Ahhoz, hogy a CFUL08 detektor által adott jelekhez neutronfluxus-értékeket lehessen hozzárendelni, ismernünk kell a detektort érő neutronfluxus abszolút értékét. Ennek meghatározásához a paksi atomerőműben alkalmazott, üzemi tranziensek számítására is képes C-PORCA programrendszer kívánjuk felhasználni. A C-PORCA csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számításokra képes, a neutronfizikai programrész hatszögletes rácsra tesztelt diffúziós modellen alapul [3]. Ahhoz, hogy a C-PORCA programot az oktatóreaktor zónájában kialakuló fluxuselozlás számítására lehessen felhasználni, a hatszögletes rácsra vonatkozó összefüggéseket és algoritmusokat négyzetes geometriára kell átírni. A modellszámításokhoz szükséges neutronreakciókra vonatkozó hatáskeresztmetszeteket a paksi atomerőműben alkalmazott HELIOS programmal számítjuk ki. A detektor jelének a számítási modellel történő predikciójához szükség van a zónán belüli neutronforrás és a detektor közötti átviteli függvény (súlyfüggvény) meghatározására is. A TDK dolgozatban e függvény meghatározását célzó munkámat mutatom be.

2.4. Az MCNP program

Az MCNP egy széleskörűen alkalmazott foton-, neutron-, elektron-részecsketranszport számítására alkalmas, Monte-Carlo elven működő kód [MCNP_Gui]. A program futása során nagy mennyiségű részecske bolyongását követi, melyek paramétereiből a matematikai statisztika módszereivel állítja elő a meghatározandó mennyiségeket (hipotetikus detektorok jeleit, a továbbiakban - az MCNP terminológiának megfelelően – tallyket). A vizsgált paraméterekre adódó eredmények szórása nagymértékben függ vizsgált részecskék számától továbbá az alkalmazott szóráscsökkentő eljárásoktól.

A program két, egymástól jelentősen eltérő módban használható. Az első, úgynevezett forrás üzemmódban egy fix energiaeozlású és térbeli kiterjedésű részecskeforrást kell definiálni. Ezt a módot többnyire ismert térbeli elhelyezkedésű forrás esetén alkalmazzák. A program alkalmas különböző reaktorfizikai mennyiségek, így többek között a neutronok térbeli és energiaspektrum szerinti meghatározására, adott forrás hatására kialakuló áramsűrűségek és dózisteljesítmény meghatározására, stb.

A másik, KCODE nevű üzemmódban a programnak nincs szüksége a felhasználó által megadott forrásra, a kód kiszámítja a jelen levő hasadóanyagból kilépő neutronok térbeli és energia szerinti elozlását, továbbá emellett meghatározhatók a kialakuló elektron- és fotontér tulajdonságai is. A forrás üzemmódtól történő talán legjelentősebb eltérés, hogy KCODE – módban a program kiszámolja az effektív sokszorozási tényezőt is.

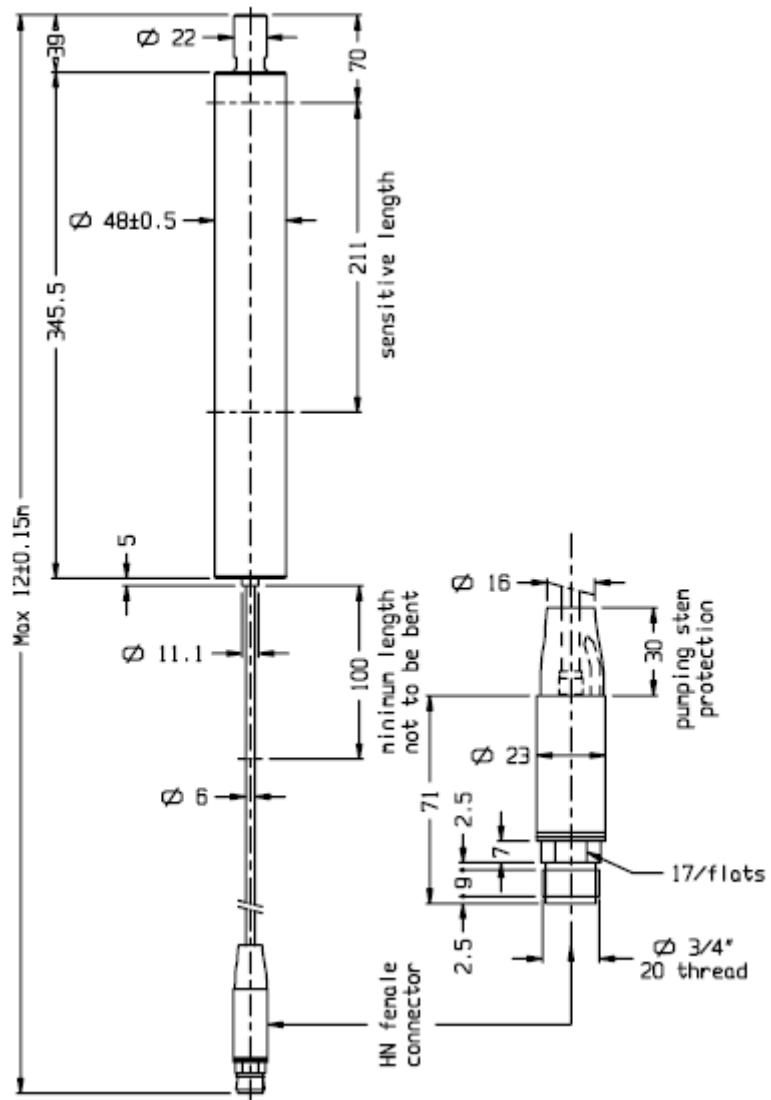
A program által mindkét üzemmódban közvetlenül detektálható tallyk: felületi részecskeáram, felületre, illetve térfogatra átlagolt részecskefluxus, továbbá meghatározható az adott cellában

leadott hasadási, illetve teljes energia. Ezeket alapul véve számtalan további mennyiség származtatása lehetséges.

Egy MCNP-input három jól elkülöníthető részre tagolódik, ezek: a geometriát alkotó cellák leírása, a cellákat határoló felületek megadása, illetve a harmadik szakaszban az anyagi jellemzők, a forrás, a tallyk, leírása történik, továbbá itt kerül sor a futási mód beállítására is. A térbeli felosztás leírása az inputban kombinatorikus geometriai elven történik. Ez azt jelenti, hogy a cellák a második szakaszban megadott felületek által meghatározott tartományok unióiból, metszeteiből és komplementereiből állíthatók elő. Ilyen módon tetszőlegesen részletes geometria előállítható, amely bonyolult problémák megoldására is alkalmassá teszi az MCNP programot.

2.5. A CFUL08 neutrondetektor

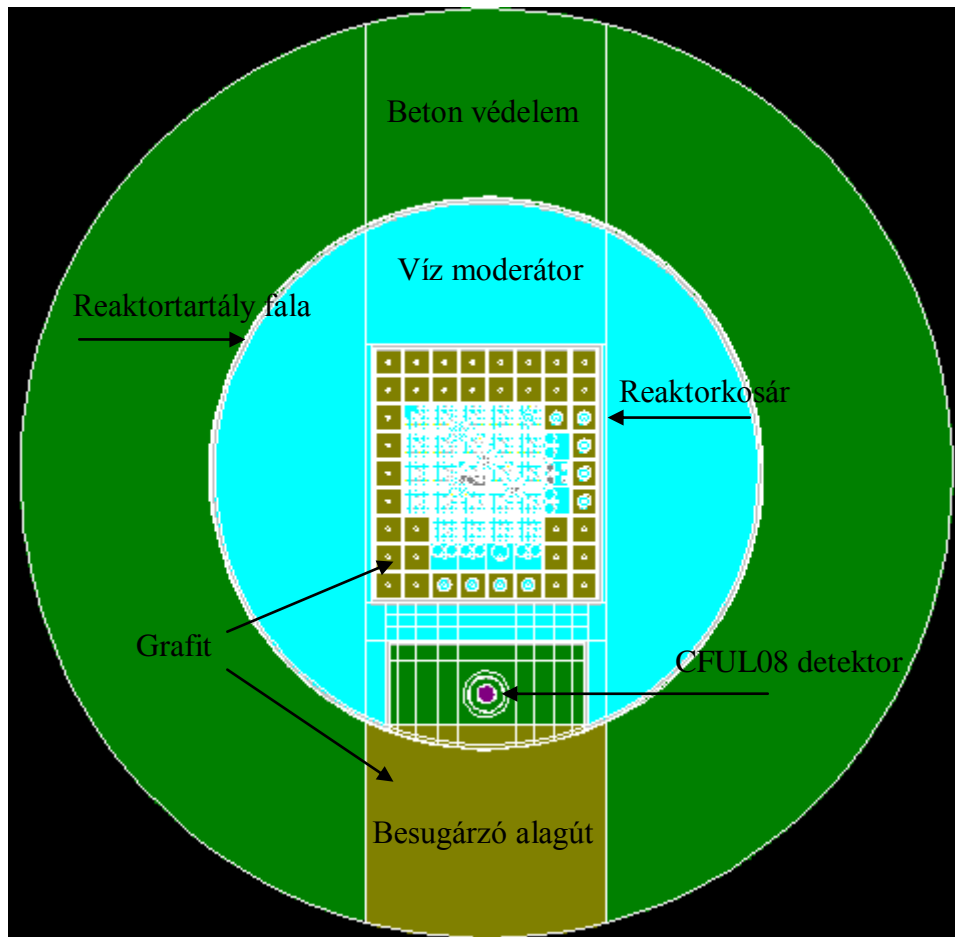
A CFUL08 hasadási kamrát a paksi atomerőműben jelenleg a teljesítmény-szabályozást szolgáló ex-core neutrondetektorként használják. A hasadási kamrák működésüket tekintve olyan ionizációs kamrák, melyek érzékeny térfogatának falára vékony réteg hasadóanyagot vittek fel. A beérkező neutronok hatására a hasadóanyagban (n,f) reakció mehet végbe. A hasadványok egyike általában a kristályrácsban marad, míg a másik az érzékeny térfogatba bejutva ionizálja a töltőgázt. A létrejött ionokat a detektorban levő elektródák összegyűjtik, a keletkező elektromos jelet a műszer elektronikája dolgozza fel. A detektorhoz a REGTRON cég új elektronikát fejleszt, amelynek segítségével az eszköz képes lesz a neutronfluxus impulzus- és áramtartományban történő mérésére is.



2. ábra: A CFUL08 detektor geometriai adatai [4]

3. Az MCNP-input

A súlyfüggvény meghatározására használt inputfájlokat egyetlen forrásfájl (továbbiakban ősinput) alapján generáltam. Az ősinputot egy, már korábban az NTI -ben összeállított input továbbfejlesztéseként készítettem. A végleges ősinputot a dolgozat mellékleteként csatoltam. A modell vízszintes síkmetszete a 3. ábrán látható.

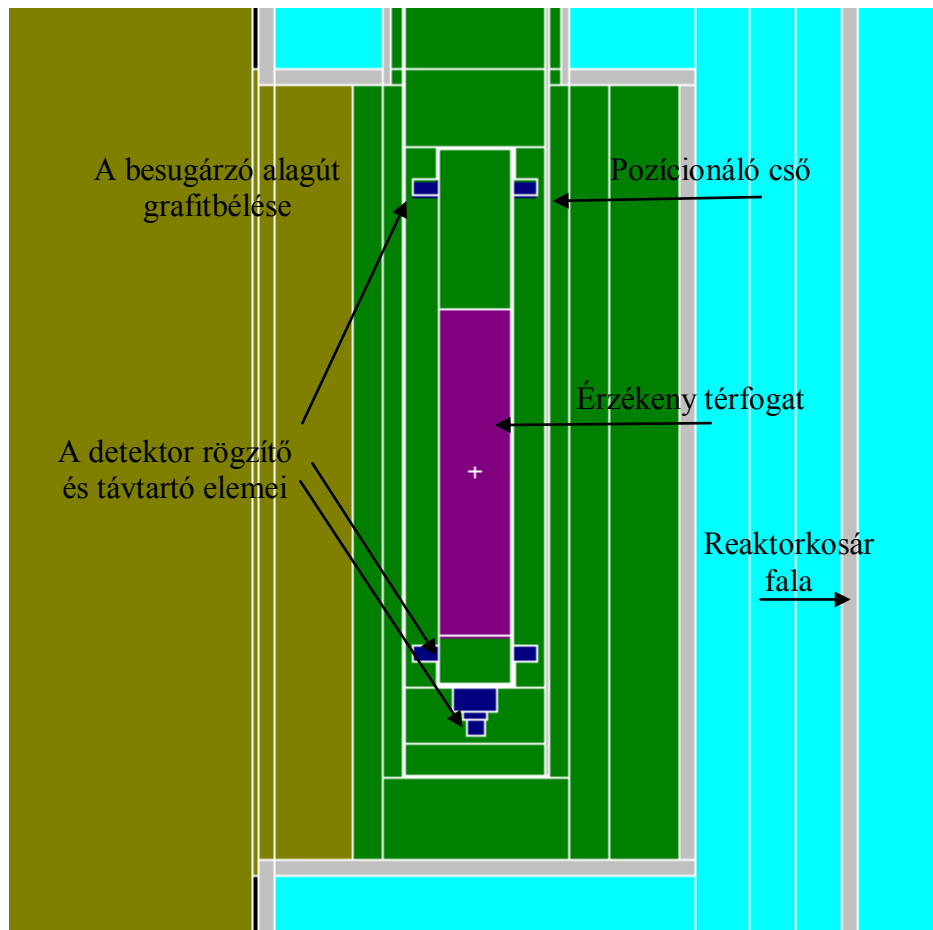


3. ábra: A teljes MCNP modell x-y síkbeli metszete

3.1. Geometria és térbeli fontossági megfontolások

A fejlesztés jelentős részét a reaktor releváns részeinek részletesebb geometriai modellezése tette ki. A kiegészítések jelentős része a termikus oszlopot és annak környezetét érintette. Az eredeti modellt kiegészítettem a besugárzó alagút reaktortartályon kívül eső részeivel. Ennek oka, hogy az besugárzó alagutat kitöltő grafitréteg neutronokra nézve reflektorként funkcionál, így az onnan visszaverődő neutronok is bejuthatnak a detektorba. Célszerűvé vált tehát a besugárzó alagút részletesebb modellezése.

Az inputba beillesztésre került a CFUL08 detektor modellje, melynek függőleges síkmetszete a 4. ábrán látható. A későbbiekben elvégzendő mérések megvalósításához szükség lesz egy, a detektort pozicionáló csőre, amely ezért a modellbe is beépítésre került (ld. 4. ábra).

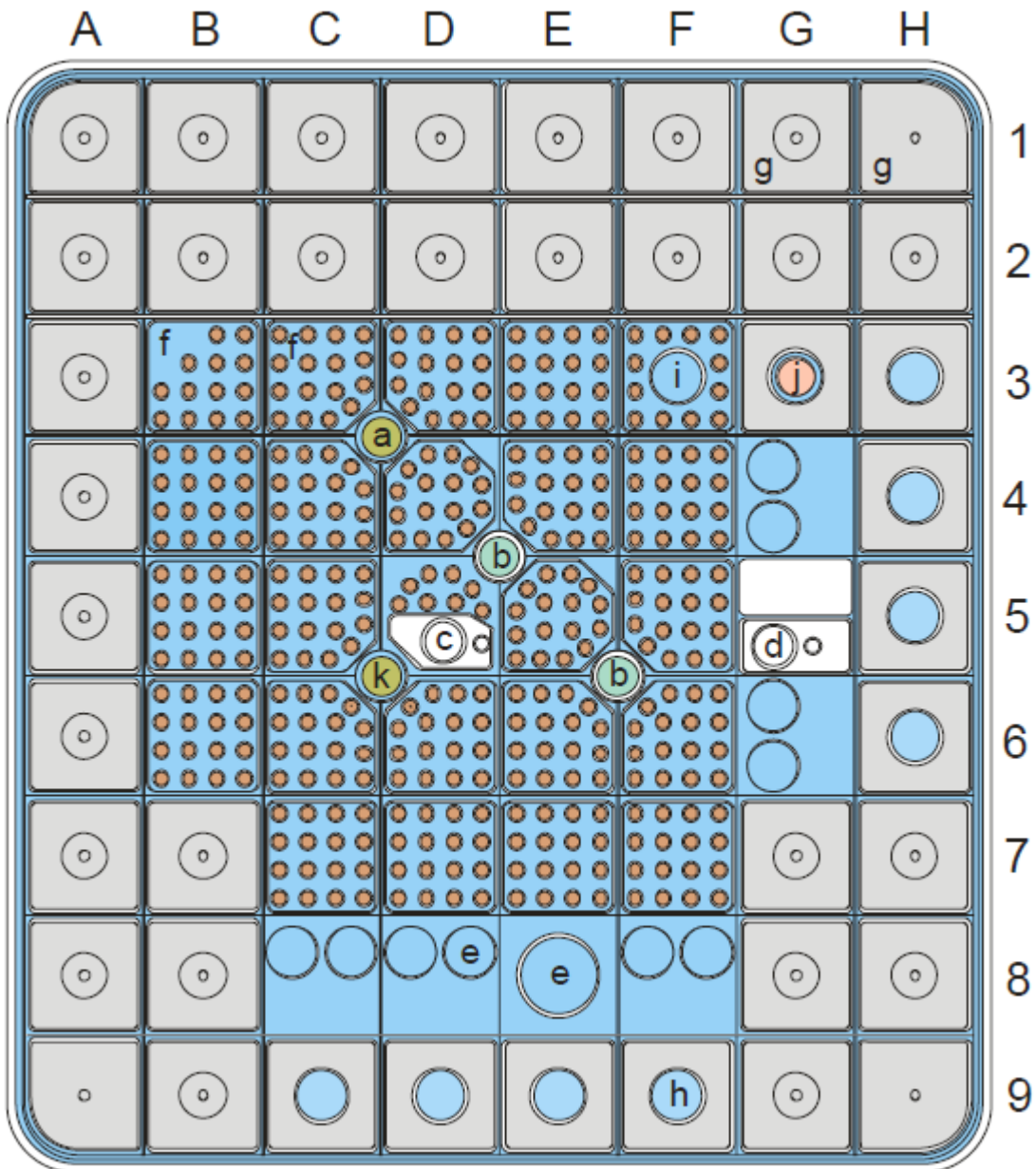


4. ábra: A CFUL08 detektor modellje és elhelyezkedése az oktatóreaktor termikus oszlopa előtt

A modell elkészítéséhez a gyártó (Photonis) weboldalán közzétett információkból indultam ki [4].

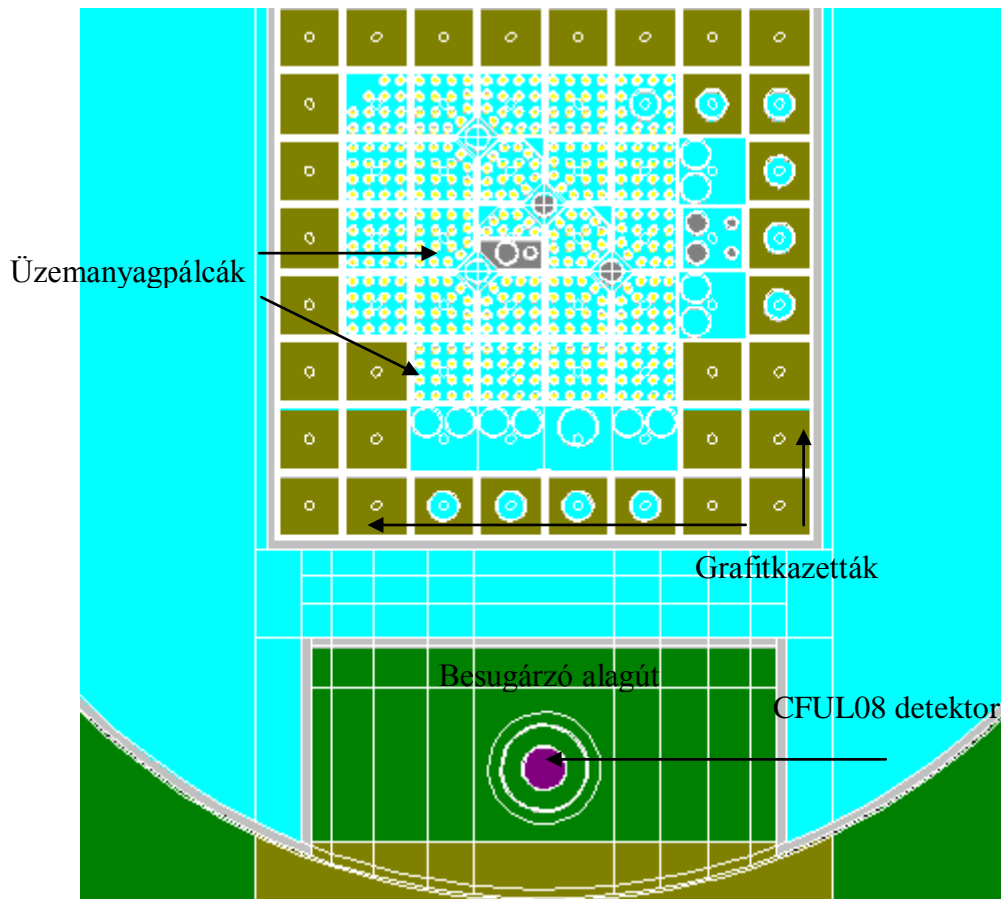
Az MCNP-inputok elkészítése során minden cellához szükséges megadni egy térbeli fontossági (importance) értéket, ami az illető cella adott részecskére vonatkozó „értékességét” jelenti. A program futása szempontjából ez azzal jár, hogy amennyiben a belépő részecske egy kisebb, pl. n -ed akkora értékességű cellából érkezik, a cellahatár átlépése után n részecske fog továbbhaladni, melyek értékessége egyenként $1/n$ -ed része lesz az eredetinek. Ha viszont n -ed akkora értékességű cellába lép a részecske, annak továbbhaladásáról vagy eliminálásáról a program sorsáról orosz rulett módszerrel dönt, amennyiben a részecske továbbhaladhat, értékessége n szerezésre nő. Ezzel a módszerrel elérhető, hogy a követett részecskék a vizsgálat szempontjából fontosabb térrészben mozogjanak, így a rendelkezésre álló számítási kapacitás jobban kihasználható. Ez különösen fontos abban az esetben, ha nagyobb mennyiségű, több órás futási időt igénylő inputfájlt kívánunk lefuttatni, ahogy ez a dolgozatom alapjául szolgáló futások esetében is történt.

Az általam elkészített inputban a reaktorkosártól a detektor irányába növeltem a cellák importance értékeit. A növelés a szomszédos cellák importance-e közötti kétszeres szorzót jelent, míg a detektortól a külvilág felé haladva ennél gyorsabban csökkentettem a cellák importance értékeit.



5. ábra: Az oktatóreaktor reaktorkosarának rajza

Az 5. ábrán a reaktorkosárról készült rajz, míg a 6. ábrán az általam készített MCNP modell a kosarat illetve detektort ábrázoló része látható.



6. ábra: A reaktorkosár egy részének és a detektor modelljének vízszintes metszete

3.2. Forrás

A súlyfüggvény meghatározásához ideális esetben az oktatóreaktor összes pálcájának összes pálcatedéből célszerű lenne neutronokat indítani. Azonban ezt korlátozza a rendelkezésre álló számítási kapacitás. Így minden kazettából egyenletes eloszlással mintavételeztem 3 üzemanyagpálcát, amit kiegészítettem a detektorhoz közelebbi kazetták közül kiválasztott további 23 pálcával. Pálcánként 6 pálcatedben helyeztem el Watt-spektrumú neutronokat kibocsátó térfogati forrásokat. A kiválasztott pálcatedek azonos rétegbe (síkokba) estek. Ahhoz, hogy az egyes pálcatedek súlyát külön-külön meghatározzam, egy input futtatásakor egyszerre egy pálcatedből indítottam neutronokat. Ezzel összesen $(24 \cdot 3 + 23) \cdot 6 = 570$ inputfájl elkészítésére és futtatására volt szükség. Az inputokat az ősinputból generáltam egy erre a célra készített Linux script segítségével.

A scriptnek megadható az ősinput, illetve a források helyének koordinátáit tartalmazó fájl. A script az ősinputról készített másolatokban a forrás koordinátáit írja felül. Ezzel az inputok generálása könnyen elvégezhető és egyszerűen reprodukálható.

Az egyes pálcatedek súlyát meghatározó számítások előtt több próbafuttatást végeztem. A tesztek során optimalizáltam az elindítandó neutronok számát. A szórás csökkentése az elindítandó neutronok számának növelését, míg a futási idő mérséklése a részecskeszám csökkentését követelte meg. Feltételeztem, hogy a detektorhoz közelebbi kazettákból származó neutronok nagyobb valószínűséggel jutnak a detektorba, mint a távolabbiak. Ez azt

jelenti, hogy a közelebbi területek súlya nagyobb, mely kívánatosá teszi, hogy ott minél kevesebb szórással terhelt eredményeket kapjak, így ebben a tartományban 1% alatti szórást igyekeztem elérni. Míg a távolabbi területek súlya vélhetően kisebb, így ott a nagyobb relatív bizonytalanság a végeredmény szempontjából elfogadható.

A fentiek alapján két területre osztottam reaktor zónáját. A detektorhoz közelebbi két kazettasorban levő pálcátizedekből 4 millió, a többiből 5 millió neutron indításával számoltam.

A számításokat a BME Nukleáris Technikai Intézetének klaszterén hajtottam végre. A számítások hossza átlagosan 225 perc volt inputonként, így az összes nettó futási idő 2137 órának adódott. Ezt tovább növelték az előzetes tesztek, illetve kiegészítő számítások.

3.3. Számítási célfüggvények (tally-k)

A méréseket a detektor érzékeny térfogatába helyezett F4 tally-vel szimuláltam, mely megadja a cellatérfogatra átlagolt neutronfluxust $1/\text{cm}^2$ dimenzióban [5]. Ahhoz azonban, hogy a detektor által mérendő fluxust megkapjuk, figyelembe kell venni, hogy a detektortérfogatba jutott részecskék nem mindegyike fog kiváltani hasadást az érzékeny térfogatot körülvevő köpenyben. Erre a célra a tally multiplier kártyát használtam a következő szintaktikával:

FM4 5.5939E-2 5003 -6

Itt az FM4 a 4-es típusú tallyre vonatkozó multiplier-t jelenti. Az $5,5939 \cdot 10^{-2}$ egy normálási faktor, mely a detektorban levő hasadásra képes magok számát veszi figyelembe, az anyagi minőségre vonatkozó információkat az 5003-as anyagcella jellemzi. A -6 kapcsoló beállításával végeredménynek az adott összetételű üzemanyag bármelyik hasadóképes magjában bekövetkező összes hasadások darabszámát kapjuk.

Az így módosított F4 tally eredménye:

$$N = k \cdot \int_0^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma_f(E) dE , \quad (1)$$

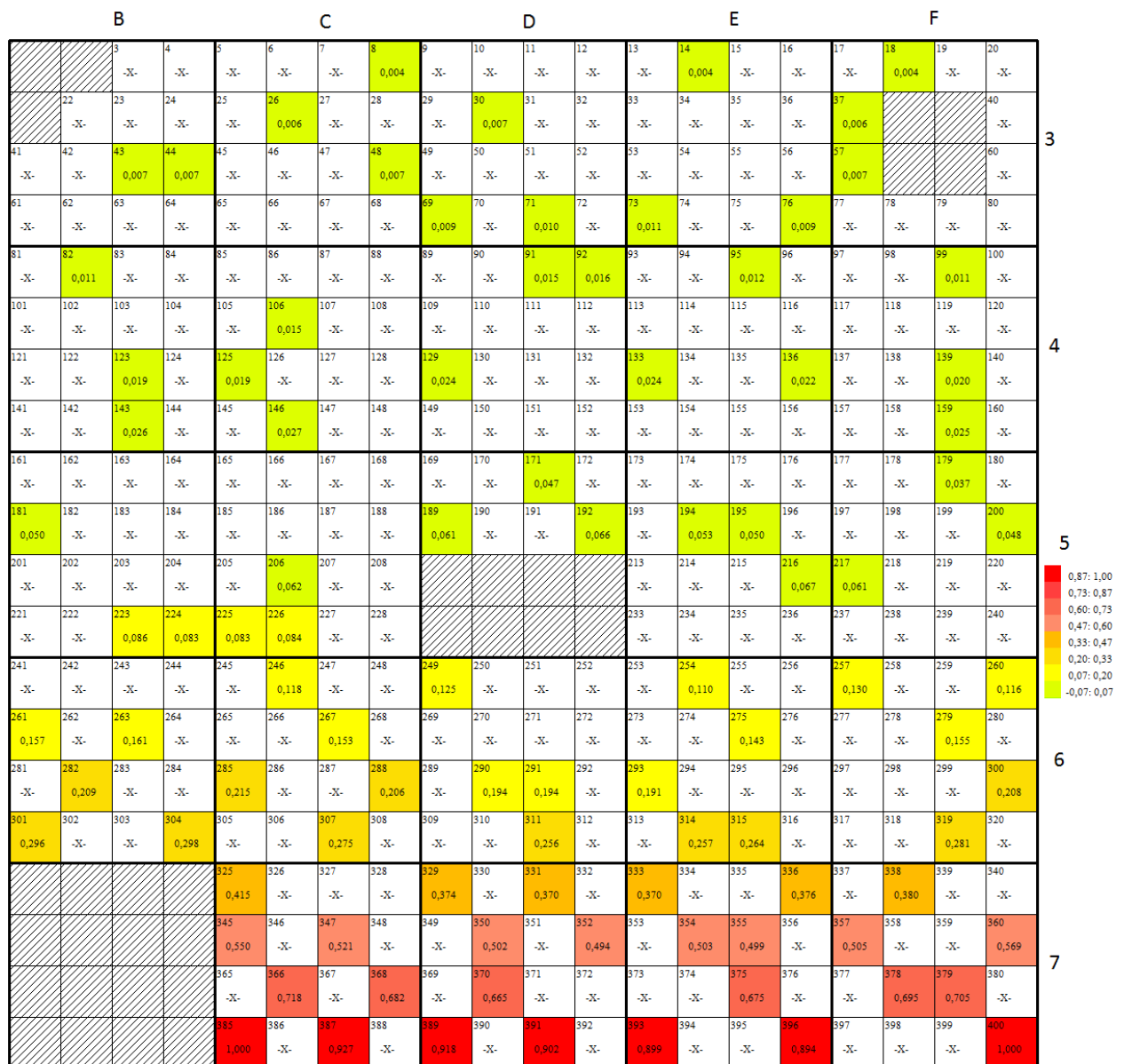
ahol N a hasadások darabszáma, k a normálási faktor, Φ a neutronfluxus, σ_f pedig a hasadóanyag hasadási hatáskeresztmetszete.

4. Az MCNP programmal végzett számítások eredményei

Az MCNP által előállított outputfájlok kiolvasására készítettem egy linux shell scriptet, amellyel kinyerhető az outputfájlból az adott pálcázated súlyát megadó tally értéke és szórása, továbbá ellenőrzésképpen kiolvastattam a pálcázated koordinátáit is.

4.1. A szimuláció eredményeképp kapott pálcázated súlyok

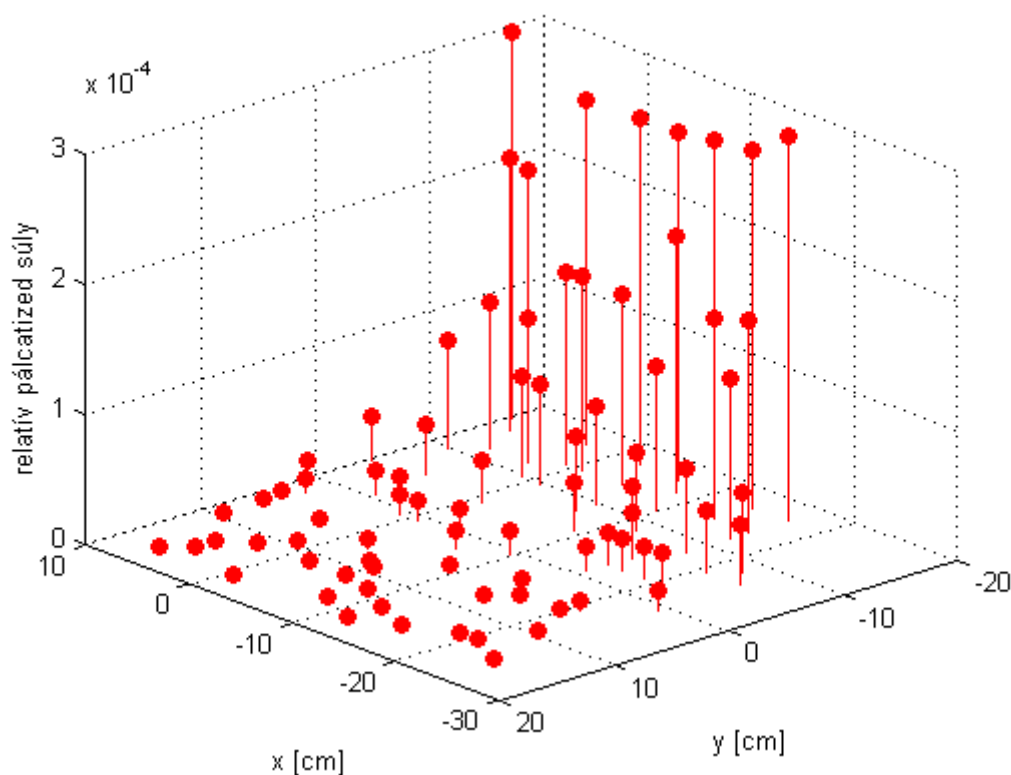
A kapott adatok megjelenítésére a Paksi Atomerőműben fejlesztett CCow, illetve a MATLAB programokat használtam. A 7. ábrán a BME oktatóreaktor zónája látható. A mintavételezett pálcák celláiban a pálca egyre normált súlya szerepel a pálca sorszámával együtt, a normálási faktor $n=2,95402 \cdot 10^{-4}$, ennek szemléletes jelentése, hogy a legnagyobb súlyú pálcázatedből nagyjából minden 3385. elinduló neutron okoz jelet a detektorban. A maradék cellákhoz tartozó értékeket nullával töltöttem fel. Az ábrán látható satírozott pozíciókban nincs üzemanyagpálca.



7. ábra: A reaktor középsíkjában mintavételezett pálcázatedek egyre normált súlyai

Az ábráról leolvasható, hogy a legnagyobb súllyal a C7 kazetta 16-os és az F7 kazetta 13-as pozícióiból induló neutronok okoznak jelet a detektorban. A 6. ábrán láthatóan a detektor középpontja D és E kazettasorok (az ábrán „kazettaoszlopok”) közötti elválasztó vonalon helyezkedik el, így első megfontolásra az ehhez a vonalhoz közeli pálcázatedeket feltételeztem legnagyobb súlyúnak. Azonban figyelembe kell vennünk, hogy a 7. kazettasor mindkét oldalán grafit reflektorok helyezkednek el (lásd 5. ábra), amelyek a szélső pálcákból származó, a detektortól távolodó neutronok egy nem elhanyagolható hányadát is a detektor felé irányítják. Ezzel megmagyarázható a legnagyobb súlyú kazetták első pillantásra meglepő elhelyezkedése.

Fontos megállapítani, hogy a kapott relatív súlyok értékei a detektortól távolodva a második kazettasor után 0,1 alá csökkennek, míg a harmadik sor után a néhány század nagyságrendű tartományban találhatók. A csökkenés szemléletesebben a 8. ábrán látható.

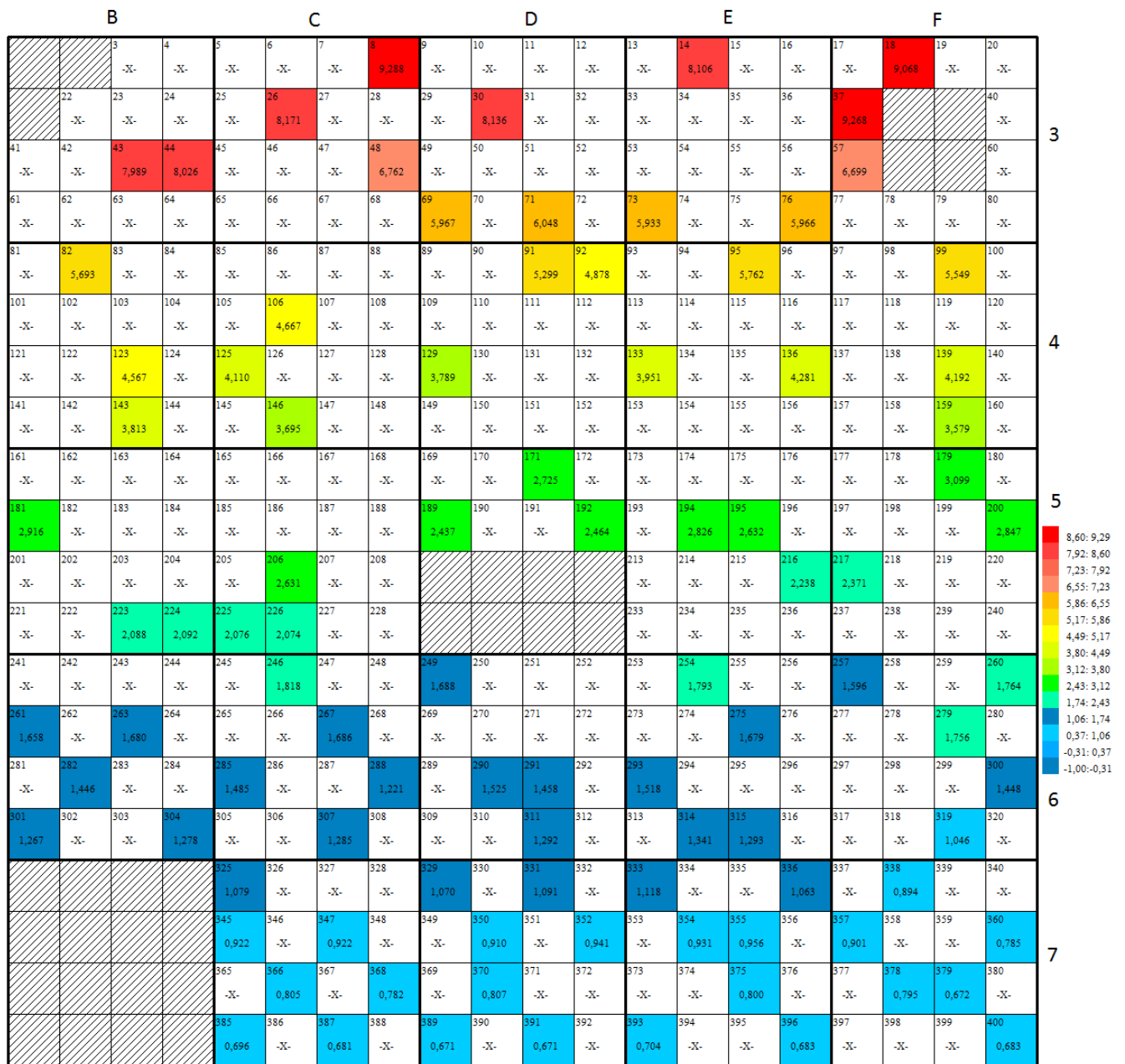


8. ábra: A relatív pálcázated súlyok síkbeli változása a reaktor középsíkjában

4.2. Az eredmények bizonytalansága

A pálcázatedek súlyainak gyors csökkenése megfelel a várakozásainknak. Ezzel a trenddel ellentétben a kapott értékek szórásai a detektortól távolodva növekednek, amint az a 9. ábrán látható. A legnagyobb súlyú pálcázatedek bizonytalansága mindössze 7‰ körül alakul, míg a zóna átellenes oldalán található szórása elérheti a 9%-ot, ezek súlya azonban csak néhány ezreléke a detektorjelhez legnagyobb hozzájárulást adó pálcázatedek súlyának, ami alátámasztja az indított részecskék számában kötött, az előző fejezetben tárgyalt kompromisszumot. Ahhoz, hogy a detektortól távolabbi kazettákban található pálcázatedekből is 1% nagyságrendjébe eső szórással terhelt eredményhez jussunk, a lefutott 5 millió helyett a 165-szeresét, több mint 820 millió neutront kellett volna elindítani, ami szükségtelenül

megnövelte volna a futási időt. Ugyanakkor a távoli kazettákban elhelyezkedő pálcátizedek súlya kellően kicsi ahhoz, hogy pontosságának növelése ne érje meg a befektetett többlet futási időt.



9. ábra: a reaktor középsíkjában mintavételezett pálcátizedek relatív súlyainak szórásai

5. Súlyfüggvény

A MCNP által kiszámított súlyértékekre történő függvényillesztés során első megfontolásra kézenfekvőnek tűnt egy háromdimenziós függvény illesztése, ami azonban problémákba ütközik. A legjobb közelítést adó illesztési paramétereket egyértelműen meg lehetne határozni az úgynevezett pszeudo inverz mátrix módszer alkalmazásával, amely azonban azt feltételezi, hogy az illesztendő függvény csak lineárisan függ az illesztendő paraméterektől [6]. Tekintetbe véve az MCNP programmal számított súlyok gyors lecsengését a detektortól való távolság növekedtével, célravezetőbbnek tűnt az x - y síkban egy gyorsabb karakterisztikus lecsengésű (pl. exponenciális) függvény illesztése, amely azonban kizárja a pszeudo inverz mátrixszal történő illesztési módszert. A paraméterektől való nemlineáris függés esetén a legkisebb négyzetek elvén alapuló illesztés optimalizálási feladatának megoldására többféle eljárás (köztük a Nelder-Mead-módszer) áll rendelkezésre. Azonban ezek nem feltétlenül találják meg a legjobban illeszkedő függvényt leíró paramétereket, nagyszámú együttható esetén az illesztési iteráció könnyen beragadhat egy lokális minimumba. Ennek a problémának az elkerülésére a háromdimenziós koordinátákhoz tartozó függvényértékekre történő illesztést felosztottam egy 1 dimenziós (z koordináta) és egy 2 dimenziós (x - y sík) adatsorhoz rendelt függvényértékek illesztésére.

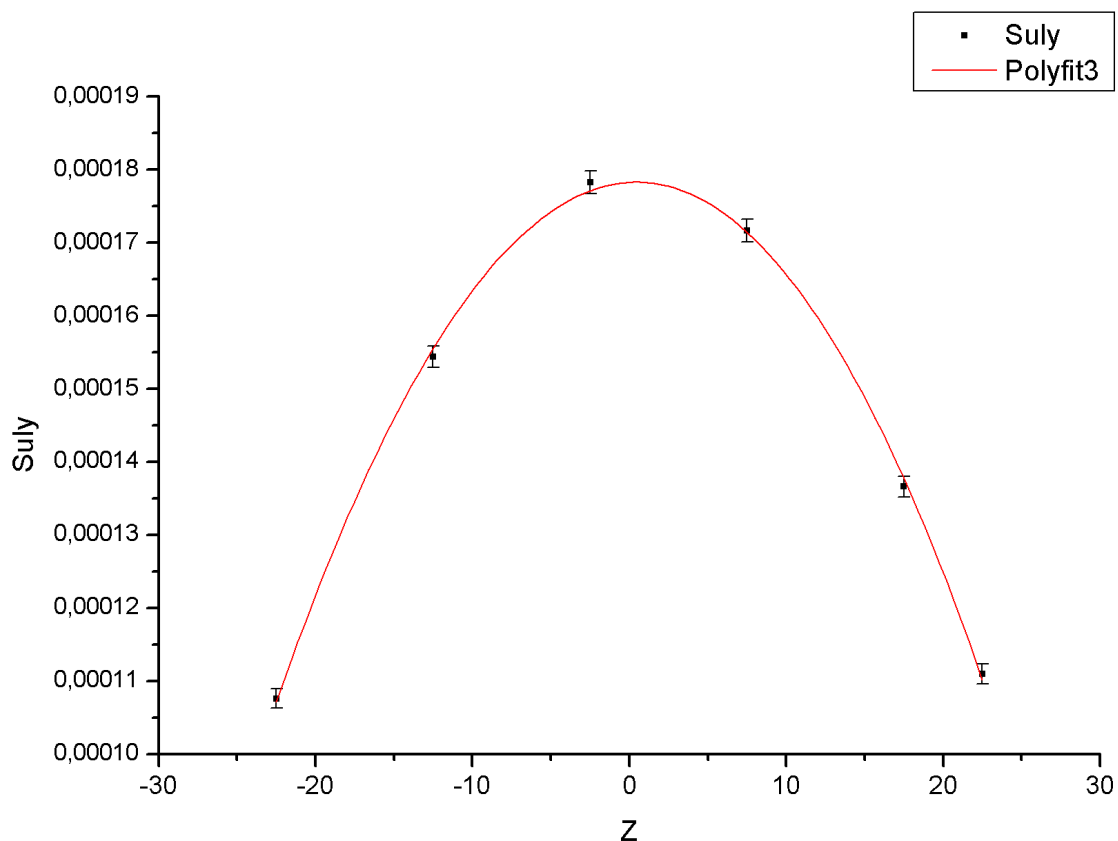
Az illesztések elvégzésére és a kapott súlyfüggvények ábrázolására MATLAB kódot készítettem.

5.1. Az illesztett függvény alakja

5.1.1. Függőleges illesztés

Az illesztést külön-külön hajtottam végre a mintavételezett pontok z koordinátái által definiált x - y síkokra, illetve külön a z tengelyre. Vizsgálataim során megállapítottam, hogy egy kazettán belül egy adott z koordinátához tartozó, az MCNP által számított súlyok nem térnek el jelentősen. Ezt figyelembe véve, annak érdekében, hogy a súlyok továbbra is mutassák a különböző z koordinátájú x - y síkokra kapott értékek közötti összefüggést, a függőleges tengely szerinti illesztést egy adott kazettára síkonként átlagolt adatsorra végeztem. A kapott eredmények lefutásának jellegét és a z tengelyen mintavételezett pontok számát (pálcánként 6) alapul véve polinom alakú görbét illesztettem. A polinom fokszámának változtatásával optimalizáltam az illesztést. Figyelembe véve, hogy magas fokszámú polinomok mellett elveszik a hat pontból vont statisztika által megszerzett előny, továbbá tekintettel arra, hogy harmadrendű görbét alkalmazva is kellően jól közelítést kapunk (lásd. 9. ábra), harmadrendű polinomok illesztése mellett döntöttem. Az MCNP által számított adatok (melyek bizonytalanságát ezek szórásával közelítettem) hibahatáron belül megegyeznek a fentebb leírt módon kapott görbe mintavételezett pontokon vett helyettesítési értékeivel. Az illesztett görbék paramétereit az I. táblázat tartalmazza, ahol a paraméterek a (2) képlet szerint értelmezendők.

$$Súly(z) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 \quad (2)$$



10. ábra: A D7 kazettára síkonként átlagolt súlyok vertikális illesztése

I. táblázat: A z tengely szerinti harmadfokú polinom illesztési paraméterei kazettánként (A kazetták azonosítására használt kód az 5. ábrán látható rácsoztásnak felel meg)

Kazetta azonosító	B3	C3	D3	E3	F3
a1	2,058E-06	1,648E-06	2,567E-06	2,425E-06	1,751E-06
a2	7,661E-09	1,200E-09	-3,191E-09	9,474E-09	-6,170E-09
a3	-1,464E-09	-9,556E-10	-1,406E-09	-1,357E-09	-1,122E-09
a4	-2,078E-11	-4,719E-12	1,653E-12	-1,464E-11	1,598E-11
Kazetta azonosító	B4	C4	D4	E3	F4
a1	5,554E-06	6,151E-06	5,460E-06	5,720E-06	5,825E-06
a2	-9,285E-09	9,604E-09	-2,471E-08	1,309E-08	8,563E-09
a3	-3,745E-09	-4,117E-09	-3,171E-09	-3,230E-09	-3,865E-09
a4	1,878E-11	-1,757E-11	4,725E-11	-2,210E-11	-4,559E-12
Kazetta azonosító	B5	C5	D5	E5	F5
a1	2,150E-05	2,237E-05	1,670E-05	1,630E-05	1,453E-05
a2	4,289E-09	3,761E-08	4,347E-09	-5,736E-09	6,583E-08
a3	-1,564E-08	-1,537E-08	-1,052E-08	-1,148E-08	-1,010E-08
a4	-2,428E-11	-8,416E-11	-4,343E-12	-4,344E-12	-1,259E-10

Kazetta azonosító	B6	C6	D6	E6	F6
a1	6,670E-05	5,693E-05	5,346E-05	5,711E-05	5,209E-05
a2	6,448E-08	2,601E-08	1,501E-08	2,211E-08	2,420E-08
a3	-4,848E-08	-4,136E-08	-3,906E-08	-4,146E-08	-3,711E-08
a4	-1,121E-10	-4,150E-11	-3,141E-11	-2,119E-11	-4,625E-11
Kazetta azonosító	B7	C7	D7	E7	F7
a1	Itt nincsenek fűtőelemek	2,034E-04	1,784E-04	1,775E-04	1,902E-04
a2		8,908E-08	1,217E-07	1,999E-07	1,982E-07
a3		-1,543E-07	-1,375E-07	-1,373E-07	-1,447E-07
a4		-8,326E-11	-1,071E-10	-3,460E-10	-3,186E-10

5.1.2. Síkbeli illesztés

Az x - y síkban történő illesztést a már függőleges illesztéssel simított adatokra végeztem. Ezáltal a külön elvégzett, x - y síkra, illetve z tengelyre vonatkozó adatokra történő illesztések csatoltá váltak.

Mivel a detektortól távolodva az egyes pálcázatokból a detektorba jutott neutronok száma, és ezzel az általuk a detektorban kiváltott jel is gyorsan csökken, olyan függvényt kellett rá illeszteni, amely ezt követni tudja. További feltétel, hogy a függvény együttthatóinak száma a lehető legkisebb legyen, elősegítve ezzel, hogy az eredeti és illesztett adatsorok legkisebb négyzetek értelemben vett eltérése a globális minimumértékre álljon be az iteráció során.

Ezen feltételeknek megfelel az exponenciális polinom függvény. Az illesztés előkészítésére végzett vizsgálataim során a legoptimálisabb választásnak a harmadfokú exponenciális polinomot találtam. Az illesztést a mintavételezett 6 darab z koordináta által meghatározott síkokban végeztem. Az illesztett függvény alakját a (3) kifejezés mutatja be.

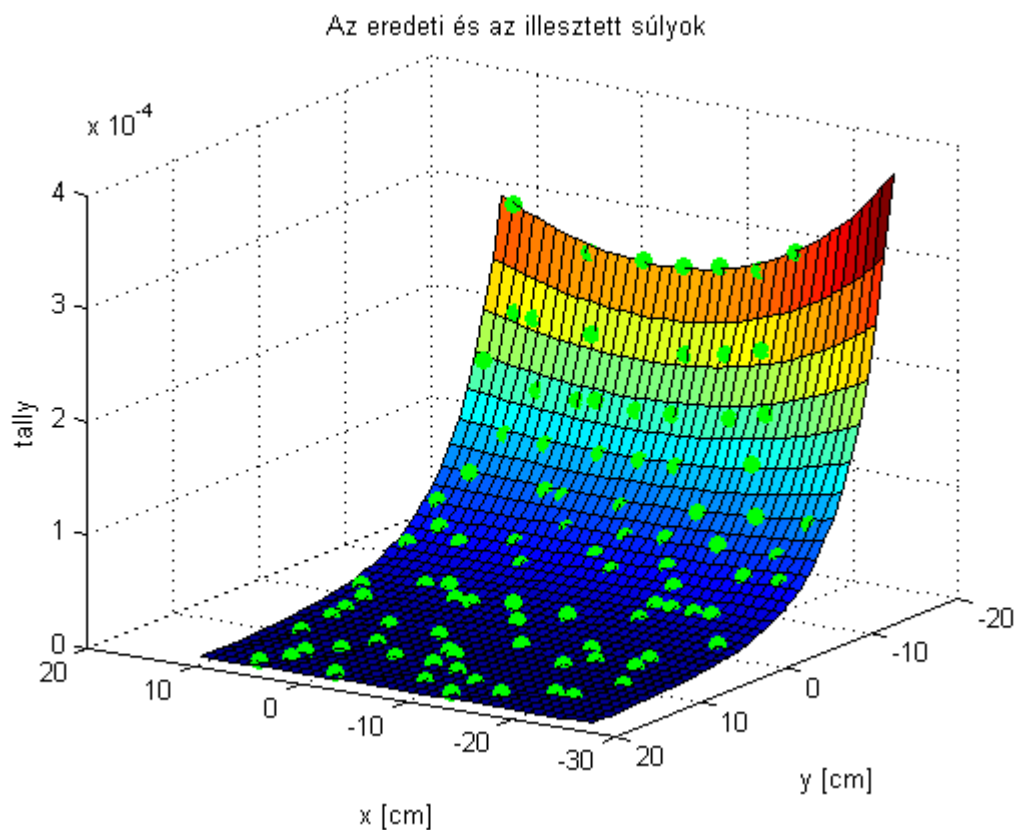
$$Súly(x,y) = \exp(b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_3 \cdot x^2 + b_4 \cdot x \cdot y + b_5 \cdot y^2 + b_6 \cdot x^3 + b_7 \cdot x^2 \cdot y + b_8 \cdot y^2 \cdot x + b_9 \cdot y^3) \quad (3)$$

II. Táblázat: Az x-y síkokra történő illesztések paramétereit

Illesztett paraméterek	z = -22,5	z = -12,5	z = -2,5	z = 7,5	z = 12,5	z = 22,5
b0	-1,229E+01	-1,189E+01	-1,097E+01	-1,160E+01	-1,184E+01	-1,174E+01
b1	3,198E-02	-1,187E-02	-3,368E-03	-2,007E-02	1,854E-02	2,073E-02
b2	-1,444E-01	-1,401E-01	-1,493E-01	-2,187E-01	-2,146E-01	-2,172E-01
b3	5,560E-03	4,884E-03	-3,577E-04	1,988E-03	3,071E-03	-4,174E-04
b4	-5,210E-03	-1,824E-03	-5,778E-04	1,743E-03	-1,918E-03	-3,648E-03
b5	6,014E-03	5,725E-03	4,139E-04	5,683E-03	5,511E-03	5,379E-03
b6	1,395E-04	2,537E-04	-4,216E-06	1,234E-04	1,101E-04	-3,723E-05
b7	-1,904E-04	-9,731E-06	-5,715E-05	3,127E-04	1,926E-04	1,182E-04
b8	-2,806E-04	-2,865E-04	-3,866E-06	-1,085E-04	-2,557E-04	-1,250E-04
b9	3,573E-04	3,195E-04	-1,869E-05	6,617E-04	5,605E-04	5,857E-04

5.2. Az eredeti és illesztett értékek egybevetése

Az illesztések elvégzése után ellenőriztem az MCNP–vel számított súlyok és az ezekre illesztett függvények helyettesítési értékeinek egymáshoz való viszonyát. Ennek első lépésként az illesztett felület, illetve az illesztendő pontokat közös grafikonon (11. ábra) ábrázoltam.

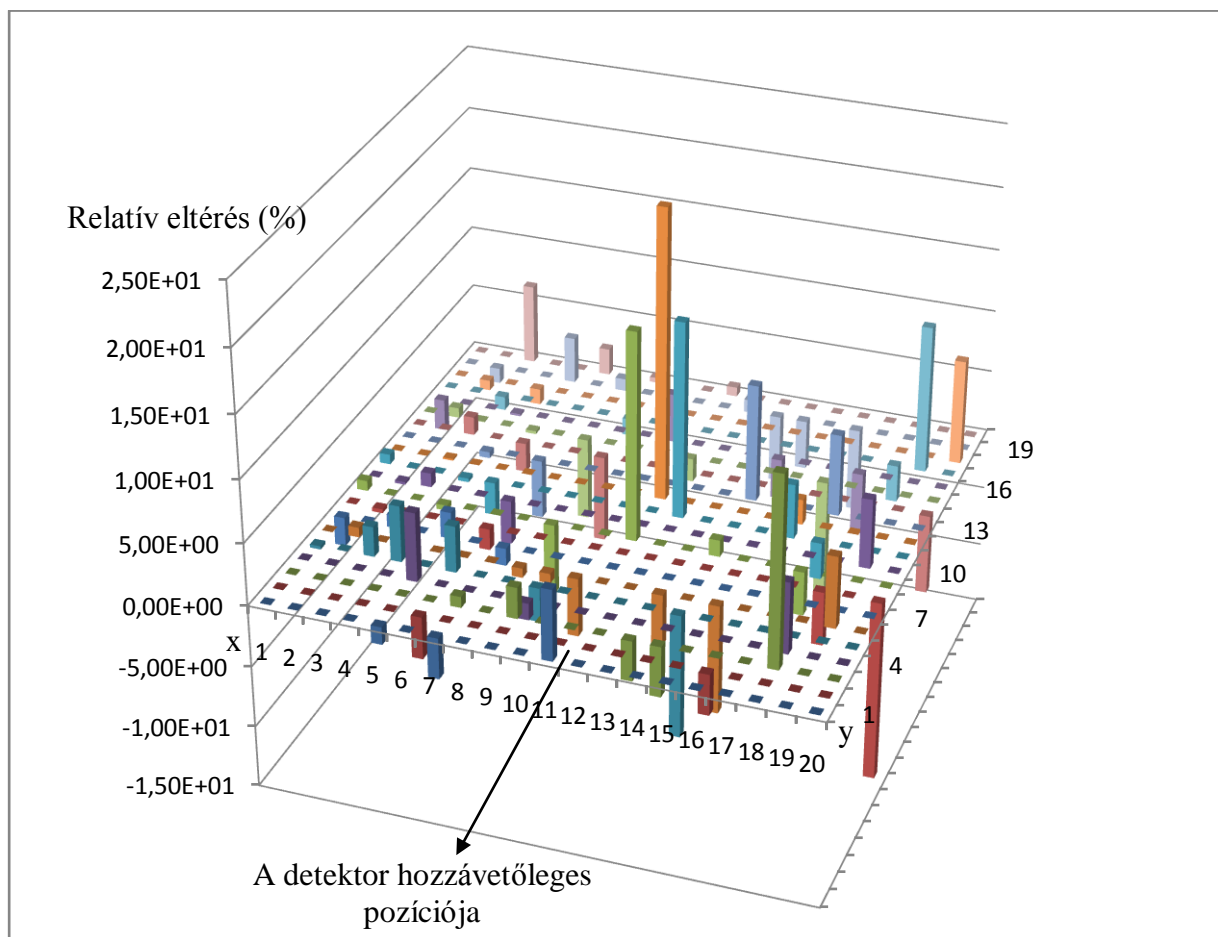


11. ábra: Az MCNP által számított súlyok és a rájuk illesztett felület

Az ábrán látható, hogy a felület jellege a mintavételezett pontok tartományán belül jól követi az eredeti értékeket. Feltűnő, hogy az $x = -30$, $y = -20$ koordináták környezetében nagyon magas értékeket ad az illesztés. Ez azonban a mintavételezett tartományon kívül esik. A 7. ábrán láthatóan ez a B7 kazetta területe, ami grafitot tartalmaz. Mint arra már korábban is utaltunk, a grafit okozza a vele szomszédos C7 kazetta legszélső pálcájának magas értékét. A súlyfüggvény további felhasználásának szempontjából a kiugró érték nem mérvadó, hiszen a függvényt a továbbiakban interpolációs célokra fogom használni (lásd 6. fejezet).

Az illesztés vizsgálatának másik, gyakran alkalmazott módszere az eredeti és illesztett értékek relatív eltéréseinek ábrázolása, ahogy az a 12. ábrán látható.

Megjegyzés: az ábrán egy hipotetikus zónasíkra vonatkozó szimulált és illesztett adatok eltérését mutatom be, mivel az Oktatóreaktor rácsa irreguláris, az oszlopok nem a tényleges pozíciójukban vannak ábrázolva, hanem azon a ponton, ahol egy reguláris rács esetén lennének. Ennek megfelelően az síkot paraméterező x - y koordináták pálcaszám dimenzióban vannak megadva, melyek zérushelye a B7 kazetta sarkán helyezkedik el.



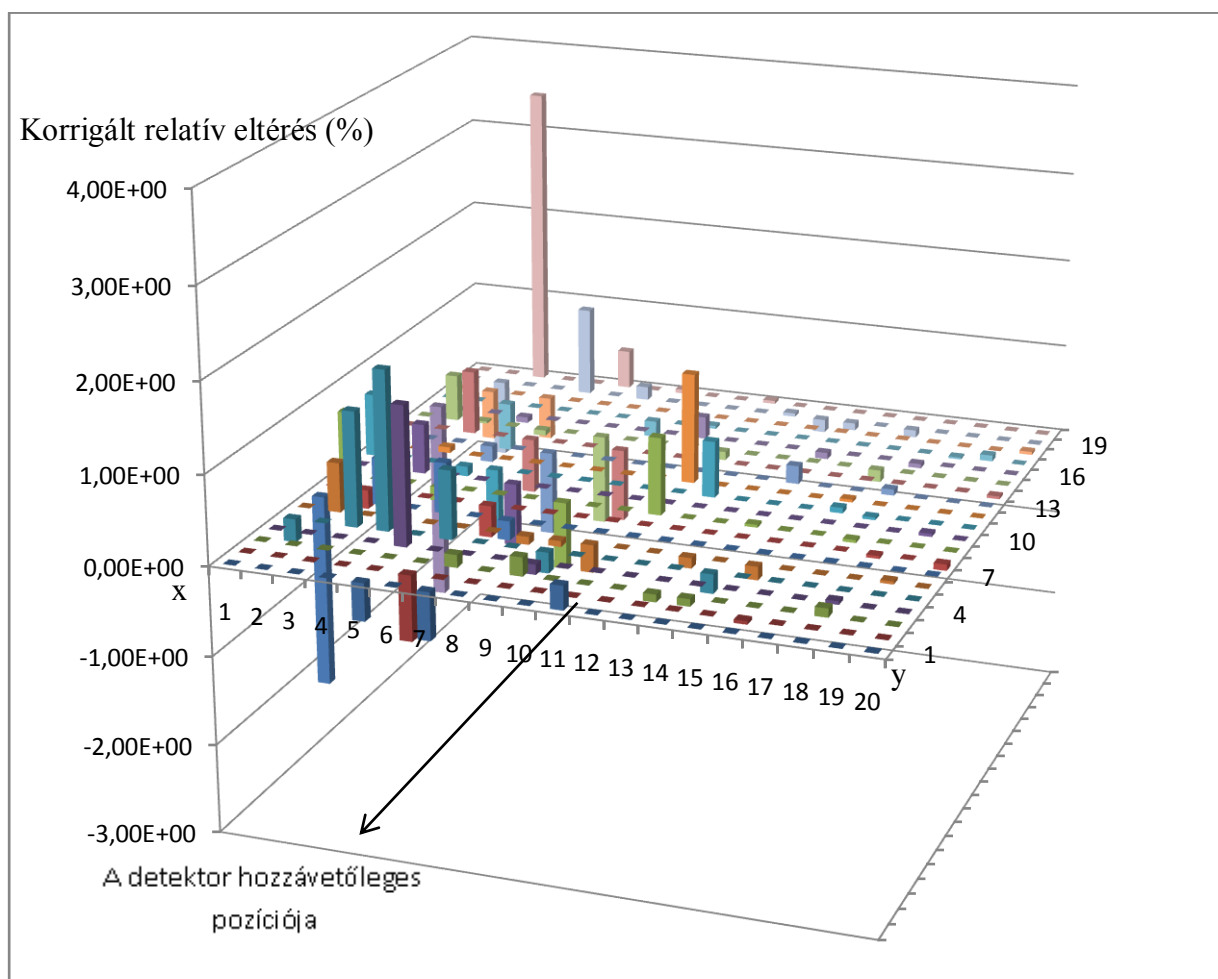
12. ábra: Az eredeti és illesztett adatok relatív eltérése százalékban kifejezve

Az ábrán jellemzően kis eltérések láthatók a detektorhoz közelebbi tartományokban, míg a távolabb részekben az eltérések elérhetik a 15-20% -ot. A távolabbi tartomány nagy relatív eltéréseit magyarázza az oda vonatkozó számított súlyok nagy relatív bizonytalansága (lásd. 9. ábra)

A detektorhoz közelebbi tartomány illetetett és számított súlyainak eltérése 5% alatti, amely az illesztés megbízhatóságát jelzi.

Külön figyelmet érdemel a reaktor közepének tartománya. Az itt kapott eredmények között 20% fölötti eltérés is előfordul. A problémát jelentő pozíciók közvetlenül a szabályozórudak mellett helyezkednek el, így itt már az egy kazettán belüli eltérések is jelentősek lehetnek a közvetlenül illetve nem közvetlenül a szabályozórudak között elhelyezkedő pálcázatok között. Ennek értelmében itt nem kívánatos az egy kazettán belüli egy síkon elhelyezkedő értékek átlagolása. A későbbiekben érdemes lehet az egyes pálcák belüli pálcázatokra külön elvégezni a z tengely menti illesztést.

A fentiekben taglalt eltérések értékelésekor figyelembe kell venni az egyes pálcák relatív súlyát is. A kis relatív súlyú a pálcázatok értékeinek pontatlansága a végeredmény szempontjából kevés jelentőséggel bír. Ezt mutatja be a 13. ábra.



13. ábra: A pálcázatok relatív súlyával korrigált százalékos eltérések

Az egyes pálcázatok súlyával való szorzás láthatóan és a várakozásoknak megfelelően minden esetben 5% alá csökkentette a (korrigált) bizonytalanságot, ez alapján a kapott súlyfüggvény az illesztési tartomány egészén elfogadhatóan egyezik az MCNP által szimulált súlyokkal.

6. Konklúzió

6.1. Az elért eredmények összefoglalása

Munkám során a CFUL08 típusú hasadási kamra új elektronikájához kapcsolódó tesztelési folyamatba kapcsolódtam be. Az elektronika tesztelésére a BME oktatóreaktorban kerül sor. Ahhoz, hogy egymástól eltérő időbeli lefolyású tranziensekre is el tudjuk végezni a tesztelést, a felhasználni kívánt reaktorfizikai programnak [3] szüksége van a reaktor CFUL08 detektorra vonatkozó súlyfüggvényére. Ezért meghatároztam azt a súlyfüggvényt, amely minden egyes pálcatedre megadja az ott keletkező hasadási neutronoktól származó beütésszám statisztikai átlagát.

A súlyfüggvény meghatározásához elkészítettem az oktatóreaktor MCNP modelljét, amely tartalmazza az oda a mérések során elhelyezendő CFUL08 detektort. A mintavételezett pálcatedeket először egyenletes eloszlás szerint mintavételeztem, majd ezeket kiegészítettem a nagyobb súlyú tartomány részletesebb feltérképezése érdekében. A súlyokat az eredeti beállításokkal fluxust számító célfüggvényből az (4) képlet alapján számítottam:

$$N = k \cdot \int_0^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma_f(E) dE , \quad (4)$$

ahol N a hasadások darabszáma, k a normálási faktor, Φ a neutronfluxus, σ_f pedig a hasadóanyag hasadási hatáskeresztmetszete.

A kiválasztott pálcatedekre az MCNP programmal kapott súlyok síkbeli és térbeli alakulása megfelelt az előzetes feltételezéseimnek. A detektortól távolodva a pálcatedek súlya gyorsan csökkent. Ettől eltérő tendenciát a C7 és F7 kazetták sarkaiban tapasztaltam. Az itt elhelyezkedő pálcatedek magas súlyát a velük közvetlenül szomszédos grafitkazetták reflektorhatásával magyaráztam.

A kapott súlyokra történő függvényillesztést két lépésben hajtottam végre. Először kazettánként a mintavételezett x - y síkokra átlagolt súlyokra illeszttem harmadfokú polinomot. Ezzel az MCNP által számított eredményeket simítottam. Majd az így kapott értékekre illeszttem síkonként harmadrendű kétváltozós exponenciális polinomot. Az eredeti és illesztett súlyok illeszkedését a százalékos relatív eltérésükkel jellemeztem. Jelentős eltéréseket a szabályozórudak közvetlen környezetében tapasztaltam, ahol a kazettánkénti átlagolás túlzottan nagy simítást eredményezett. Bár e területek relatív súlya 1% alatti, így a detektorjelhez adott hozzájárulásuk nem jelentős, a későbbiekben kívánatos lesz az e területre vonatkozó illesztés felülbírálása.

A detektorhoz közelebbi területeken az MCNP által számított és az illesztett súlyok relatív eltérése jellemzően 2% alatti. Az illesztés pontosságának növelésére a súlyok gyors térbeli változására, valamint az ezen a területen való sűrűbb mintavételezésre való tekintettel célszerű lehet kazetták helyett kisebb tartományokra (pl. szomszédos pálcatedek négyes csoportjaira) elvégezni a síkonkénti átlagolást.

6.2. Kitekintés

A TDK feladatban meghatározott súlyfüggvényt a CFUL08 detektor új feldolgozó elektronikájának teszteléséhez lehet majd felhasználni. Ahhoz, hogy a CFUL08 detektort érő neutronfluxus abszolút értékét meg tudjuk adni, ismerni kell a reaktor térbeli teljesítményeloszlását, illetve annak időbeli alakulását.. Ennek meghatározásához a paksi atomerőműben alkalmazott, üzemi tranziensek számítására is képes VERETINA programrendszert kívánjuk felhasználni. Amennyiben ezt sikerül átalakítani az oktatóreaktor követelményeinek megfelelően, távlati célként megvalósítható egy a paksi atomerőműben üzemelőhöz hasonló online reaktorfelügyelő rendszer. Ez lehetőséget biztosíthat a BME NTI hallgatóinak egy, az ipari rendszerhez hasonló felügyelőrendszeren történő gyakorlásra.

7. Hivatkozások

- [1] Dr. Fehér Sándor, Dr. Czifrus Szabolcs: KNK-4 ex-core detektor VVER-440 aktív zónára vonatkozó térbeli súlyfüggvényének meghatározása Monte Carlo módszerrel – BME NTI 2002
- [2] <http://www.regtron.kfkipark.hu/assy.html>
Photonis: Neutron and gamma detectors:
www.photonis.com/attachment.php?id_attachment=55
- [3] An advanced tool of nuclear reactor core analysis for reactor physicists
VERONA - expert system
- [4] <http://www.photonis.com/nuclear/?s=CFUL08&submit=>
- [5] MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5;
LA-UR-1987, April 24, 2003
- [6] http://keck.ucsf.edu/~sabes/documents/Sabes_LinearEquations.pdf