

Bevezetés

Az atomreaktorok energiatermelését a maghasadások sorozata az ún. láncreakció biztosítja. Ezért kulcsfontosságú, hogy a láncreakció pillanatnyi állapotát (időbeli változásának menetét) pontosan ismerjük. A véges méretű reaktorokban lezajló láncreakció egészének időfejlődése egyetlen paraméterrel jellemezhető, ez az *effektív sokszorozási tényező*, jele k_{eff} , amit most az egyszerűség kedvéért k -val jelölünk. Ez alapján a láncreakció lehet

- időben állandó (*kritikus*), ekkor $k = 1$;
- időben csökkenő (*szubkritikus*), ekkor $k < 1$;
- időben növekvő (*szuperkritikus*), ekkor $k > 1$.

Az energiatermelő atomreaktorok ideális üzemállapota a *kritikus* állapot, ekkor időben állandó az energiatermelés, ezáltal egyenletes teljesítményen működik az üzem.

A kritikusság állapotát azonban valamilyen módon létre kell hozni, ezt biztonsági szempontok miatt mindig úgy teszik, hogy a reaktorban mélyen *szubkritikus* rendszert hoznak létre, majd fokozatosan („alulról”) közelítik a *kritikus* állapotot. Ezzel a módszerrel biztosított, hogy nem történik reaktormegszaladás, amikor is a láncreakció menete, ezáltal a reaktor teljesítménye túlságosan gyorsan emelkedik.

Ahhoz, hogy tudjuk, milyen messze van a reaktor a kritikus állapottól, pontosan ismernünk kell a *szubkritikus* rendszer k értékét. Ez az ún. *szubkritikus neutron sokszorozással* meghatározható, melynek lényege, hogy ha egy külső forrást *szubkritikus* reaktorba helyezünk, akkor időben állandó neutronszám (vagy teljesítmény) alakul ki. Legyen N az adott elrendezésben beállt konstans neutronszám, S az időben állandó külső forrásból származó állandósult neutronszám (urán nélküli, $k=0$ esetben), akkor

$$N = \frac{S}{1-k}. \quad (1)$$

Tehát a külső forrás által létrehozott állandósult neutronszám ismeretében az egyes már uránt is tartalmazó összeállításokhoz tartozó állandósult neutronszám mérésével közvetlenül számítható az effektív sokszorozási tényező.

A k azonban egy speciális mennyiség, függ a reaktor méretétől, geometriájától és anyagi összetételétől. Az anyagi összetételtől való függés érthető, hiszen nem mindegy milyen és mennyi hasadóanyag ill. egyéb anyagtípus (pl.: moderátor, abszorbens, tartóelem stb.) van a reaktorban. A geometria fontossága a neutronok kifolyása miatt jelentős. A neutronok két hasadás között szórások révén veszítenek energiájukból, miközben valamekkora utat bejárnak a reaktorban. Ha a neutron a reaktor felületéhez közel kerül, vagy eleve ott keletkezett, akkor nagy valószínűséggel kilép a zónából, így a láncreakció szempontjából elveszett, nem válthat ki újabb hasítást (ez a kifolyás). Ezt a hatást csökkenteni kell, ezért fontos tényező a felület/térfogat arány (kifolyás/keletkezés) a reaktorok geometriájának megválasztásakor.

A következő feladatokban a *szubkritikus* rendszerek *sokszorozási tényezőjét* és a geometriának a láncreakcióra gyakorolt hatását kell megvizsgálni egy egyszerűsített szimulációs modellen keresztül.

Bevezetés: Ismerkedjünk meg a programmal!

A program a pr4.exe fájlal indítható. Indítás után válasszuk ki a nyelvet (itt most az egyszerűség kedvéért csak magyar) majd adjuk meg az azonosítónkat.

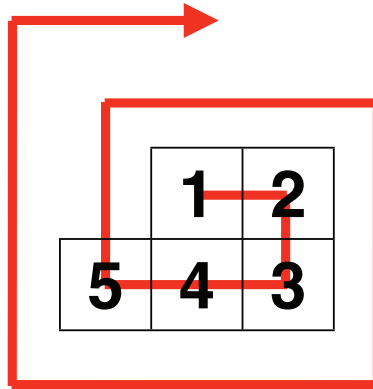
Elsőként ismerkedjünk meg a program kezelőfelületével, próbáljunk meg építőteglákat elhelyezni a rácson (uránt, neutronforrást és detektort – a többit nem fogjuk használni). Vizsgáljuk meg hogyan tudunk neutron forrásereőséget állítani (nyomjunk jobb gombot az oldalpanelen a neutronforrás feliraton). Próbáljuk ki hogyan tudunk időgrafikont ábrázolni, hogyan tudjuk átállítani az üzemanyag típusát, hogyan tudunk konfigurációkat elmenteni és betölteni. Nézzük meg mi található az egyes fülek alatt, illetve hogyan tudjuk a program futását vezérelni (indítás, leállítás, folytatás, léptetés). A fülek közül a mérés során a teljes neutronszámon és a detektor által mért neutronszámon kívül másra nem lesz szükségünk.

Fontos hogy a program mérés szempontjából fontos funkcióit jól tudjuk kezelni, probléma esetén kérjünk segítséget a felügyelőktől! A programmal való ismerkedés ideje ne haladja meg a 15 percet, különben nem lesz elég idő a feladatok megoldására!

1. Feladat – kritikussági kísérlet

A feladat során **kritikussági kísérletet** fogunk végrehajtani – az egyszerűség kedvéért – tiszta 235-ös urán üzemanyaggal, moderátor nélkül. Ennek során üres reaktorzónával indulva, *biztonságos* lépésenként haladva folyamatosan növeljük a rendszer sokszorozási tényezőjét, majd végül túllépjük a kritikusságot, kismértékben superkritikussá tesszük a rendszert. Ilyen módon meghatározzuk a rendszer adott geometriához rendelt kritikus tömegét. A tömeget az urántömbök számával mérjük, jelöljük ezt m -el. A mérés során mindig a **gyors** neutronok számát figyeljük, a termikus populációt hagyjuk figyelmen kívül.

1. Állítsunk be 100% U-235 üzemanyagot, a neutronforrás erősségét pedig állítsuk 200-ra. **Figyelem!** Ez azt adja meg, hogy a forrás hány neutronot bocsájt ki időlépésenként, ami nem azonos az (1) képletben szereplő, a tisztán forrás által egy adott geometriában létrehozott állandósult neutronszámmal!
2. Helyezzünk egy forrást a (sor,oszlop)=(8,8) pozícióba, illetve egy detektort a (8,18) pozícióba. (A számozás a széleken 0-val kezdődik - figyeljük a kiírást!)
3. Indítsuk el a szimulációt, majd várjuk meg amíg beáll az állandósult állapot (használjuk az időgrafikont!) Mivel a beütésszámok szórása a beütések gyökével arányos, ezért a relatív mérési bizonytalanság annál kisebb, minél több neutron van a rendszerben. Tehát ahogy közeledünk a kritikusság felé, relatíve annál pontosabban tudjuk megállapítani az állandósult neutronszámot.
4. **Olvassuk le a zónában található teljes-, illetve a detektoron mért gyors neutronszámot, ez lesz az (1) képletben használt S forrástag** a teljes reaktorra, illetve a detektorra vetítve. A továbbiakban ezt használjuk fel k számításához.
5. Helyezzünk be egyetlen urántömböt a reaktor (8,13) pozíciójába, éppen a forrás és detektor közé félúton. Az állandósult állapot beállta után mérjük meg az $m=1$ -hez tartozó N neutronszámot, és számítsuk ki belőle az (1) képlet alapján a k értékét mind a teljes, mind a detektor által mért neutronszámbra alapozva. **Figyelem!** Soha ne a detektor által alul kiírt pillanatnyi k értékét olvassuk le, mert az erősen ingadozik.



6. Az ábrán látható sorrendben haladva helyezünk be újabb és újabb urántömböket a reaktorba, és az egyes módosítások után az állandósult állapot elérését követően mindig határozzuk meg a kétféle (teljes ill. detektoros) k értéket. A szimulációt nem szükséges mindig nulláról újraindítani, menet közben is be lehet tenni az urántömböket.
7. Az első néhány tömb behelyezése után **kezdjük el készíteni egy grafikont, ahol a k értékét ábrázoljuk az urántömbök számának függvényében**, mind a kétféle neutronszámra alapozva (rajzoljuk ugyanabba a koordináta-rendszerbe a két görbét). Ez a grafikon a mérés legfontosabb eleme. Ezzel menet közben egyszerű *extrapoláció* segítségével minden lépésben *megbecsülhetjük* a kritikus tömeget. Ezen becslést felhasználva az első pár tömb után már haladhatunk nagyobb lépésekben (2-4 tömb berakásával egyszerre) úgy, hogy továbbra is szubkritikus állapotban tartjuk a reaktort. Minden újabb adag urán behelyezése után határozzuk meg k -t, majd pontosítjuk a kritikus tömegre vonatkozó becslésünket, hogy meghatározzuk, biztonságosan még mennyi uránt tehetünk be a következő lépésben. Törekedjünk arra, hogy az egész mérés során legalább 10-15 adatpontunk legyen, de nem kell egy-egy tömbönként haladni! **Minden lépés esetén röviden indokoljuk meg, hogy miért éppen annyi urántömböt adtunk hozzá a zónához a következő lépésben, amennyit!**
8. Folytassuk a folyamatot egészen addig, amíg már nagyon közel érünk a kritikussághoz ($k > 0.9$), ekkor váltsunk ismét tömbönkénti berakásra. Megfigyelhetjük, hogy minél közelebb vagyunk a $k=1$ értékhez, annál többet kell várni az állandósult állapot beállítására. **Miért lehet ez?**
9. A kritikus állapot nem feltétlenül egész m esetén következik be, ezért könnyen lehet, hogy az utolsó lépésben szubkritikusból egy urántömb hozzáadásával már egyből szuperkritikusba fordul a rendszer ($k > 1$). Ennek elérését az jelzi, hogy nem tudunk állandósult állapotot elérni, a neutronok száma a reaktorban az idővel nem asszimptotikusan tart egy értékhez, hanem exponenciálisan nő. A mérésünk alapján az adott geometriában mekkora lehet a **kritikus tömeg?**
10. A szimulációs feladat során a detektoros- illetve teljes neutronszámokon alapuló k meghatározások közül **melyik vezet a biztonságos úton a kritikusságba, és miért?**

2. Feladat – kritikussági kísérlet „visszafelé”

Az első feladat végrehajtása és a kérdések megválaszolása után hajtsuk végre a kritikussági kísérletet „visszafelé” is: mérjük meg k értékét azon tömegek mellett ahol már korábban is, de most visszafelé, kívülről építjük fel ugyanazt a geometriát. (Tipp: most hogy már ismerjük a kritikus tömeget, nem kell olyan óvatosan eljárunk mint eddig. Nem szükséges az egész reaktort szétszedni és újra összerakni előlről – hogyan lehet másképp, a legkevesebb anyagmozgatással elvégezni ezt a feladatot, a második fajta $k(m)$ görbék kimérését?)

11. Mit tapasztalunk, milyen eltérés lesz az így kapott $k(m)$ görbékben az 1. Feladatban mértékhez képest?
12. A mérés során nyert tapasztalatok alapján döntsük el, hogy a valódi reaktorokat „kívülről befelé”, vagy „belülről kifelé” kell-e felépíteni? Indokoljuk meg a válaszunkat!
13. Mi lehet a kapott eredmény fizikai oka?

3. Feladat

Miután az 1. feladatban meghatároztuk a kritikus tömeget, vegyük a lehető legnagyobb négyzet alakú szubkritikus elrendezést, legyen az ezt alkotó tömbök száma X .

14. Hány tömbből áll ez a rendszer, mekkora X értéke?

A következőkben minden elrendezést pontosan X urántömb segítségével építsünk meg. Ismét helyezzük a forrást a (8,8) pozícióba, a detektorra most nem lesz szükségünk, azt távolítsuk el. A korábbi feladatokban meghatározott X számú építőkockából építsünk a 13-as oszlopra mint függőleges tengelyre nézve tükörszimmetrikus elrendezéseket úgy, hogy minden urántömb legalább egy másik urántömbbel lapjával érintkezzen, ne legyen szabadon álló tömb (átlós érintkezés nem jó).

15. Építsünk olyan tükörszimmetrikus elrendezéspárokat, amik egymásból egyetlen urántömb áthelyezésével kaphatók, és vizsgáljuk ezen párosok sokszorozási tényezőjének különbségét! Az egyes elrendezések sokszorozási tényezőjét mindig a korábban is használt (1) képlet segítségével állapítsuk meg a reaktorban található teljes neutronszámból.
16. **Próbáljuk megtalálni ezen elrendezésekből azt a párt, ahol a lehető legnagyobb k változást okozza egyetlen tömb áthelyezése!** A zsűri munkáját segítő az elkészült párokat mentjük le a program mentés opciójával, illetve képként is!
17. **Indokoljuk meg a választásunkat, írjuk le gondolatmenetünket!**

(Az erre a részfeladatra kapható pontszámokat a legnagyobb k változást elért versenyzőhöz skálázzuk.)

Próbáljunk meg minden, a leírásban feltett kérdésre választ és indoklást találni. A munkát minden feladatpontban folyamatosan dokumentáljuk, a pontozás alapja az elkészített grafikonok és jegyzőkönyvek minősége, a gondolatmenetek és indoklások helyessége. Minden pontban indokoljuk meg a lépéseinket. A jegyzőkönyv készítéséhez szükség esetén használhatunk olyan számítógépes programokat (számológép, excel, stb), amelyek a szimulációs számítógépen találhatóak. Saját gépet, „okostelefont” stb. a Verseny szabályai szerint tilos használni. Minden elektronikus fájlt a mérés során az azonosítónkra nevezett mappában mentjük le, ezt a forduló után a zsűri a kiértékeléshez a gépekről lementi. A zsűri – a papíron beadott jegyzőkönyv mellett - csak azokat a fájlokat tudja figyelembe venni, amelyek ebben a mappában vannak. Törekedjünk a szisztematikus munkára és átlátható jegyzőkönyvre.

Jó munkát!