



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

# Rúdejtéses mérések vizsgálata az inverz kinetika módszerével

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

**Jeczkó Levente**

Témavezető:

Ványi András Szabolcs

doktorandusz

BME Nukleáris Technikai Intézet



Budapest, 2021.

„Tudatlanságból sohasem lesz biztonság.”

---

*Teller Ede*

# Kivonat

A modern diffúziós kódok a megfelelő paraméterek ismeretében egy reaktor teljes kampányát képesek szimulálni. A programok validálásához, illetve a számítások kezdeti- és peremfeltételeinek meghatározásához reaktoros mérések szükségesek. Ebbe a csoportba tartozik a reaktivitásértékeség mérése is, amelynek egyik praktikus módja az inverz kinetika. Ezt a módszert a pontkinetikai egyenletrendszerből vezethetjük le, ez egyben limitálja érvényességi körét is. Az inverz kinetika alkalmazásával a neutrondetektorok által az aktív zónában mért beütésszámokból kiszámítható a reaktivitás időbeli alakulása. A detektáláshoz használhatók az általános monitorozás céljából vagy speciálisan a mérésekhez beépített detektorok, míg a számoláshoz ismernünk kell többek között a rendszert jellemző későneutron-paramétereket, a neutrondetektorok becsült holtidejét, valamint a holtidőkorrekció matematikai figyelembevételének módját. Inverz kinetikával történő reaktivitásértékeség-meghatározás céljából a BME Oktatóreaktorban is számos mérés történt az elmúlt 15-20 évben, ahogyan a Paksi Atomerőműben rendszeresen végeznek hasonló méréseket.

TDK munkám során MATLAB környezetben inverz kinetikai megoldó programot fejlesztettem. A program a számoláshoz szükséges adatokat paraméterként fogadja, majd ezek segítségével meghatározza a beolvasott beütés adatsorhoz tartozó reaktivításokat. A bemeneti paraméterek széles köréhez tartozik a generációs idő, az effektív későneutron-hányadok és a kapcsolódó bomlási állandók, az értékeség számolásához használt átlagolási intervallumok, a holtidőkorrekcióhoz használt modell, valamint az alkalmazott numerikus módszerek. A program a hibaszámítást valamennyi releváns paraméter Monte Carlo elvű mintavételezésével végzi. Egy adott paraméter kizárólagos perturbálásával érzékenységvizsgálat is végezhető. Az elkészült programmal az Oktatóreaktor 2016-os Időszakos Biztonsági Felülvizsgálatát megelőző, valamint 2021-es, részben saját, rúdejtéses mérések adatait értékeltem ki.

# Tartalomjegyzék

<b>1. fejezet - Bevezető</b>	<b>4</b>
1.1. Az inverz kinetika módszer . . . . .	5
1.1.1. Levezetés . . . . .	5
1.1.2. Alkalmazások . . . . .	6
1.2. A reaktivitás mérésének módszerei . . . . .	6
1.2.1. Reaktivitásmérés szuperkritikus reaktorban . . . . .	6
1.2.2. Reaktivitásmérés szubkritikus reaktorban . . . . .	7
1.2.3. Inverz kinetika . . . . .	8
<b>2. fejezet - Az inverz kinetika kód bemutatása</b>	<b>9</b>
2.1. Általános jellemzők . . . . .	9
2.2. Neutrondetektorok holtidejének kezelése . . . . .	9
2.2.1. A holtidő fogalma . . . . .	9
2.2.2. A holtidőkorrekció különböző megvalósításai a detektortípustól függően . . . . .	9
2.2.3. A holtidő becslése . . . . .	10
2.3. Differenciál- és integrálszámítás . . . . .	11
2.3.1. Numerikus deriválási lehetőségek . . . . .	11
2.3.2. Numerikus integrálási lehetőségek . . . . .	12
2.4. A reaktivitás grafikus ábrázolása és az értékeség számolása . . . . .	12
2.5. Bizonytalanságbecslési lehetőségek . . . . .	13
2.6. A program működésének ellenőrzése . . . . .	13
<b>3. fejezet - Rúdejtéses mérések</b>	<b>14</b>
3.1. A mérés elve . . . . .	14
3.2. Az Oktatóreaktorról röviden . . . . .	14
3.3. Korábbi mérések . . . . .	15
3.4. Saját méréseim . . . . .	15
<b>4. fejezet - Mérések kiértékelése</b>	<b>17</b>
4.1. Korábbi mérések . . . . .	17
4.1.1. 2021.02.23. - Kiértékelés . . . . .	17
4.1.2. 2021.02.23. - Bizonytalanságbecslés . . . . .	19
4.1.3. 2021.02.25. - Kiértékelés . . . . .	21
4.1.4. 2021.02.25. - Bizonytalanságbecslés . . . . .	21
4.1.5. LND detektoros mérések kiértékelése és az eredmények hibabecslése . . . . .	22
4.1.6. A régebbi CFUL mérések tapasztalatai . . . . .	22
4.2. Saját méréseim . . . . .	23
4.2.1. Az adatok kiértékelése . . . . .	23
4.2.2. Bizonytalanságbecslés . . . . .	25
4.3. Az automata és kézi szabályozórudak reaktivitásértékesége és annak hibája . . . . .	25
4.3.1. Automata rúd . . . . .	26
4.3.2. Kézi rúd . . . . .	26
<b>5. fejezet - Összefoglalás</b>	<b>27</b>
<b>6. fejezet - Kitekintés, további célok és lehetőségek</b>	<b>27</b>
<b>7. fejezet - Köszönetnyilvánítás</b>	<b>28</b>

# 1. fejezet - Bevezető

1942 decemberében Chicagóban beindították az első atomreaktort az ottani egyetem területén egy tenispálya lelátója alatti helyiségben [1]. A kísérletet, amelyben több zseniális szellemi képességekkel rendelkező szakember vett részt, Enrico Fermi olasz fizikus vezette, akit később a nukleáris korszak atyjának is neveztek. A közel 5 tonna természetes uránnal működő reaktor moderálására több mint 300 tonna grafitot használtak. A kísérlet bebizonyította, hogy a neutron-indukálta maghasadások sorozatán alapuló nukleáris reaktor megvalósítható.

Az azóta eltelt csaknem 80 évben a nukleáris ipar rengeteget fejlődött, kezdetben sajnos nagyrészt a nukleáris fegyverek megalkotására létrehozott Manhattan-projekt keretében [2, 3, 4, 5]. A háborús idők szörnyű tapasztalatait utáni évtizedekben túlnyomó részt a nukleáris energia békés célú felhasználása került előtérbe, amelyre ma már számos, egymással együttműködő világszervezet ügyel. Példaként említhetjük a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséget, amely számos tevékenysége részeként rendszeresen felülvizsgálja tagországok nukleáris létesítményeit és gyakorlatait. Saját megfogalmazásuk szerint a nukleáris tudomány és technológia biztonságos és békés felhasználásáért dolgoznak [6].

Az energetikai reaktorok hatékonyabbá, biztonságosabbá és gazdaságosabbá válásának evolúciójában, illetve az új típusú atomreaktorok fejlesztésében [7], jelentős szerep jut a reaktorfizikai módszerek és számítások javításának. A reaktorfizika célja a szabályozott, önfenntartó láncreakció leírása, amely lényegében a neutronok fázistérbeli leírását jelenti. Az egyik legfontosabb mennyisége a reaktivitás, amely gyakorlatilag az effektív sokszorozási tényező egytől való relatív eltérése. Ezt gyakran az effektív későneutron-hányad egységeiben fejezzük ki, amely egységet dollárnak nevezünk.

A reaktorfizika alapegyenlete a transzportegyenlet, amely mérlegegyenletként magába foglalja a láncreakció során a neutronok keletkezésének és eltűnésének minden lehetséges módját. Két formája a differenciális illetve az integrális transzportegyenlet, melyek mindegyike kielégíti az utóbbi állítást egymással ekvivalens módon.

A transzportegyenlet differenciális alakja:

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Psi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t)}{\partial t} = -\boldsymbol{\Omega} \text{grad} \Psi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) - \Sigma_t(E) \Psi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) + Q(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t), \quad (1)$$

amelyben  $v$  a neutronok sebessége,  $\Psi(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t)$  a szögfüggő fluxus,  $\boldsymbol{\Omega}$  a neutron haladási irányába mutató egységvektor,  $\Sigma_t(E)$  pedig a totális makroszkopikus hatáskeresztmetszet. Az egyenlet bal oldala a neutronháztartás időbeli változását jelenti, amely az egyenlet jobb oldala szerint betudható a tekintett nyalábból történő nettó kifolyásnak, a lehetséges magreakcióknak és a forrástag által leírt neutrontermelődésnek. Ez utóbbi tag írja le a rugalmas és rugalmatlan szórásokból, a hasadásból és az esetleges külső forrásból származó neutronok keletkezését.

$$Q(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) = \int_{4\pi} \int_0^\infty \Sigma_s(E' \rightarrow E, \boldsymbol{\Omega}' \boldsymbol{\Omega}) \Psi(\mathbf{r}, E', \boldsymbol{\Omega}', t) dE' d\boldsymbol{\Omega}' + \frac{f(E)}{4\pi} \int_{4\pi} \int_0^\infty \nu(E') \Sigma_f(E') \Psi(\mathbf{r}, E', \boldsymbol{\Omega}', t) dE' d\boldsymbol{\Omega}' + S(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t) \quad (2)$$

A transzportegyenlet egy inhomogén, lineáris integro-differenciálegyenlet, amelynek megoldása még numerikus módszerekkel is igen nehéz feladat, analitikus megoldás pedig csak néhány egyszerűbb esetben létezik, pl. Case-módszer. Éppen ezért a reaktorfizikában kénytelenek vagyunk egyszerűsítő közelítésekkel élni, amelynek eredményeként minden egyes közelítéssel kicsivel könnyebben megold-

ható problémához jutunk. Így érkezünk meg az egycsoport diffúzióegyenlethez is.

A transzportegyenlet egyik leggyakrabban alkalmazott közelítése a diffúzióegyenlet, melyet úgy kaphatunk meg, hogy a szögfüggő fluxust és a szórási magfüggvényt gömbfüggvények szerint kifejtjük lineárisan anizotrop rendig, majd a kapott egyenlet, illetve annak az  $\Omega$ -val történő megszorzásával konstruált újabb egyenlet szögfüggését a teljes  $4\pi$  térszögre történő integrálással elimináljuk. Ezután két további feltételezéssel élünk, melyek egyike, hogy a neutronáram deriváltja zérus, míg a másik, hogy a szórási magfüggvény lineárisan anizotrop komponense nem járul hozzá a neutron energiájának a megváltozásához a szórás során. Így kapjuk meg az

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, E, t)}{\partial t} = \text{div} [D(E) \text{grad} \Phi(\mathbf{r}, E, t)] - \Sigma_t(E) \Phi(\mathbf{r}, E, t) + Q_0(\mathbf{r}, E, t) \quad (3)$$

egyenletet, melyet általános diffúzióegyenletként ismerünk.

A diffúzióegyenlet energiafüggése kiküszöbölésének célszerű módja a csoportelmélet, melynek egyszerűbb esete az egycsoport közelítés. Ez az energiováltozó oly módon történő kezelését jelenti, melynek során diszkretizáljuk azt, ami az egycsoport közelítésben a teljes energiaskála egyetlen csoportba sorolását foglalja magában. Ennek kiindulópontja a reaktorfizika alaptétele, amely szerint asszimptotikus tartományokban a spektrum nem függ a helytől, tehát

$$\Phi(\mathbf{r}, E, t) = \Phi(\mathbf{r}, t) \cdot \Psi(E) . \quad (4)$$

A 4. egyenletet a 3. egyenletbe behelyettesítve, majd az energiováltozótól integrálással megszabadulva, illetve az egycsoport állandókat bevezetve eljutunk az

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = D \Delta \Phi(\mathbf{r}, t) - \Sigma_a(\mathbf{r}) \Phi(\mathbf{r}, t) + \nu \Sigma_f(\mathbf{r}) \Phi(\mathbf{r}, t) \quad (5)$$

egycsoport diffúzióegyenlethez.

## 1.1. Az inverz kinetika módszer

### 1.1.1. Levezetés

A pontkinetika a reaktorkinetika egyik leggyakrabban használt közelítése, amely feltételezi, hogy a fluxus tér-, energia- és szögfüggése szeparálható az időfüggéstől:

$$\Phi(\mathbf{r}, E, \Omega, t) = \Psi_0(\mathbf{r}, E, \Omega) \cdot \varphi(t) . \quad (6)$$

Ebben a kifejezésben  $\varphi(t)$  a hely-, energia- és szögváltozóktól függetlenített fluxus amplitúdó, amely csak az idő függvénye. A feltételezés lényege, hogy a neutronfluxus időbeli változása során annak térbeli eloszlása nem változik, tehát a fluxus térbeli eloszlását leíró alakfüggvény időben állandó. A pontkinetikai egyenletrendszer legkönnyebben a későneutronokkal kiegészített, időfüggő, egycsoport diffúzióegyenletből vezethető le.

A későneutronok a teljes neutronháztartás csupán néhány tizedszázalékát teszik ki, jelentőségük azonban kulcsfontosságú a láncreakció szabályozhatósága szempontjából, így az atomerőművek biztonságának garantálásában. A későneutronok hányadát  $\beta$ -val jelöljük. Keletkezésük egyes hasadási termékeknek köszönhető, melyekből körülbelül 60 darab létezik. Ezeket későneutron-anyamagoknak nevezzük, koncentrációjukat leggyakrabban  $C_i$ -vel jelöljük. Az egyenletek egyszerűsítése és a praktikusság kedvéért a későneutronokat általában 6 (esetleg 8 vagy 12) csoportba soroljuk anyagjaik bomlási állandói szerint. Az így kiegészített diffúzióegyenlet mellé a későneutron-anyamag koncentrációkra is szükséges felírni annyi egyenletet, ahány csoportot definiáltunk. Az így kapott egyenletrendszerben a fluxust, a későneutron-anyamagkoncentrációkat és a külső forrást a hely szerinti

teljes, ortogonális függvényrendszer szerint kifejtve, majd a sajátfüggvények ortogonalitását kihasználva jutunk a pontkinetikai egyenletrendszerhez.

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi_n(t)}{dt} &= \frac{\rho_n - \beta}{\Lambda} \varphi_n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_{in}(t) + S_n(t) \\ \frac{dC_{in}(t)}{dt} &= -\lambda_i C_{in}(t) + \frac{\beta_i}{\Lambda} \varphi_n(t), i = 1, \dots, 6,\end{aligned}\tag{7}$$

ahol  $\Lambda$  a generációs idő,  $\lambda_i$  az  $i$ -edik későneutron-anyamag bomlási állandója,  $S_n$  a külső forrásnak, míg  $\varphi_n$  és  $\rho_n$  rendre az amplitúdónak és a reaktivitásnak az  $n$ -edik módusa. A pontkinetika érvényességi köre addig terjed ki, ameddig a fluxus faktorizációja érvényes, tehát ha jelentős a kiegészítés, történnek visszacsatolások vagy bármilyen egyéb okból az alakfüggvény jelentősen változik, érvényét veszti. A második egyenletet  $t$  szerint integrálva a későneutron-anyamag koncentráció kifejezhető  $\varphi(t)$ -vel, majd ezt az első egyenletbe behelyettesítve megkaphatjuk a 8. összefüggést, amelynek segítségével  $\varphi(t)$ -t mint egy neutrondetektor jelét kezelve reaktivitást számíthatunk. Ezt nevezzük inverz kinetikai egyenletnek.

$$\boxed{\frac{\rho(t)}{\beta} = 1 + \frac{\Lambda}{\beta} \frac{d\varphi(t)}{dt} - \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\beta} \lambda_i \int_{-\infty}^t \varphi(t') e^{-\lambda_i(t-t')} dt'}{\varphi(t)}}\tag{8}$$

Láthatjuk, hogy a módszer alkalmazásához ismernünk kell mind a  $\lambda_i$  bomlási állandókat, a  $\Lambda$  generációs időt és a  $\beta_i$  későneutron-hányadokat is. Mivel a számlálóban lévő integrál alsó határa mínusz végtelen, a gyakorlatban a mérés megkezdése előtt célszerű huzamosabb ideig kritikus állapotban üzemeltetni a reaktort, hogy a későneutron-anyamag koncentrációk felvegyék egyensúlyi értékeiket [8]. A 8. inverz kinetikai egyenlet a  $t$  időpillanatban a reaktivitást dollárban adja meg. Az inverz kinetikáról részletesebben a már említett [8] könyvön kívül a [9, 10] irodalmakban olvashatunk.

### 1.1.2. Alkalmazások

Ez az eljárás gyakori és hasznos módszer, amit napjainkban is széles körben alkalmaznak az iparban a reaktorok üzemeltetése során. Magyarországon a paksi reaktorok üzemeltetésének állandó része az inverz kinetika használata [11]. Ezt a módszert használja például az ÁNEREM rendszer is RMR módban. Általános gyakorlat reaktorindításkor a zóna betöltése után úgynevezett indítási mérések végzése, amelynek során ellenőrzik például a szabályozórudak teljes integrális értékességét, illetve meghatározzák a differenciális rúdértékességeket is. A reaktivitás meghatározásához itt az ex-core széles tartományú detektorok jeleit használják.

A módszert széleskörűen alkalmazzák nem csak az ipar, de a kutatások területén [12, 13], akár gyors reaktorokban is [14]. A mérések célja leggyakrabban reaktivitásértékesség mérése, illetve a zóna monitorozása (reaktiméter) [15, 16, 17].

## 1.2. A reaktivitás mérésének módszerei

A reaktivitásmérésnek számos módja van, melyek közül a lehetőségekhez mérten mindig azt kell kiválasztani, amely az adott esetben alkalmazható módszerek közül a legmegbízhatóbb eredményt szolgáltatja. Az alábbiakban ismertetek néhány, különböző esetekben javasolt megoldást, amelyek a reaktor állapotától függően alkalmasak a reaktivitás mérésére.

### 1.2.1. Reaktivitásmérés szuperkritikus reaktorban

Szuperkritikus állapotban lévő reaktor esetén - bizonyos keretek között - nagyon pontos módszer lehet a reaktivitás mérésére a kétszeresítési idő módszere. Ahhoz, hogy ezt érdemben tudjuk tárgyalni,

ismernünk kell a reciprokóra egyenletet.

Ha a 7. pontkinetikai egyenletrendszerben  $\varphi(t)$ -re és  $C_i(t)$ -re

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \varphi_0 \cdot e^{\omega t}, \text{ illetve} \\ C_i(t) &= C_{i0} \cdot e^{\omega t}\end{aligned}\quad (9)$$

próbafüggvényeket alkalmazzuk, akkor a későneutron-anyamag koncentrációra vonatkozó egyenletből

$$C_{i0} = \frac{\beta_i/\Lambda}{\omega + \lambda_i} \varphi_0, i = 1, \dots, 6 \quad (10)$$

lesz. Ennek és a 9. kifejezéseknek a 7. egyenletrendszer fluxusra vonatkozó egyenletébe történő beírásával néhány lépés után elérkezhetünk a reciprokóra egyenlethez:

$$\frac{\rho}{\beta} = \frac{\Lambda}{\beta} \omega + \omega \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i/\beta}{\omega + \lambda_i}, \quad (11)$$

amely a kétszerezési idő ( $T_{2x}$ ) és az  $\omega = \ln(2)/T_{2x}$  összefüggés ismeretében megadja a reaktivitást dollárban.

A kétszerezési idő módszerével történő reaktivitásmérés úgy történik, hogy szuperkritikus állapotban, növekvő teljesítmény mellett neutrondetektorral monitorozzuk a beütések számát, így gyakorlatilag megmérjük az általános

$$\varphi(t) = \sum_{j=0}^6 \varphi_j e^{\omega_j t} \quad (12)$$

függvényt. A reciprokóra egyenlet gyökeinek jellemzője, hogy szuperkritikus állapotban ezek legnagyobbja pozitív ( $\omega_0 > 0$  ha  $\rho > 0$ ), a többi negatív. Ennek eredményeként elegendő idő elteltével a 12. általános megoldás

$$\varphi(t) \approx \varphi_0 \cdot e^{\omega_0 t} \quad (13)$$

alakot ölt. A kezdeti szakaszt elhagyva a mért adatokra exponenciális függvényt illesztünk, amelyből illesztési paraméterként kapjuk  $\omega_0$ -at, illetve a kétszerezési időt. Ebből a 11. reciprokóra-egyenlet segítségével megkapjuk a reaktivitást.

A módszer maximum 0,2 - 0,3 \$ reaktivitásig alkalmazható szuperkritikus állapotú reaktorban, hiszen nagyobb szuperkritikus reaktivitás már túlságosan kicsi kétszerezési időt eredményezne. Ebben a - kritikushoz közeli - tartományban a reciprokóra-egyenlet meglehetősen pontos eredményt ad, így ez az eljárás az egyik legpontosabb megoldás a reaktivitás mérésére.

### 1.2.2. Reaktivitásmérés szubkritikus reaktorban

Szubkritikus reaktorállapotban történő reaktivitásmérésre több megoldás kínálkozik, melyek közé tartozik az  $1/N$  módszer és a pulzált neutronforrás módszere is.

Ha egy szubkritikus reaktorba időben állandó  $S$  neutronforrást helyezünk, a 7. pontkinetikai egyenletrendszer megoldása

$$\varphi(t) = -\frac{\Lambda S}{\rho} + \sum_{j=0}^6 \varphi_j e^{\omega_j t}. \quad (14)$$

Mivel azonban ilyen állapotban minden  $\omega$  negatív, a második tag idővel zérussá válik, így a beütések egy állandó aszimptotikus értékhez fognak tartani. Nincs más dolgunk, mint detektorral mérni az időegység alatti beütések  $N$  számát, hiszen az arányos  $\varphi(t)$ -vel. Ennek ismeretében

$$\rho = -\frac{\Lambda S}{N} \quad (15)$$



alapján a reaktivitás megadható, amely összefüggés megmagyarázza a módszer elnevezését is.

Egy másik, az  $1/N$  módszernél gyakran sokkal pontosabb metódus a pulzált neutronforrással történő mérés. A pulzált neutronforrás rövid ideig tartó neutronimpulzust juttat a reaktorba állítható  $T$  időközönként. Ennek használata mellett időanalizátorral kell mérni a beütésszámot minden periódusban, tehát minden neutroncsomag érkezésétől a következő érkezéséig. Az így kapott mérési adatok feldolgozásának, majd ebből a reaktivitás számolásának kétféle módja is van. Ezek egyike Simmons és King, a másik pedig Sjöstrand módszere.

Az időanalizátor egy csatornájában detektált neutronok adódnak egyrészt a legutóbb bejuttatott neutroncsomagból, másrészt a  $T$  periódusidő egész számú többszöröseivel korábban bevitt neutronokból.

$$\varphi(t)dt = \sum_{j=0}^6 \frac{\varphi_j}{1 - e^{\omega_j T}} e^{\omega_j t} dt \quad (16)$$

A reciprokóra egyenlet gyökeket vizsgálva feltesszük, hogy

$$\omega_6 \approx -\frac{\beta}{\Lambda} \left(1 - \frac{\rho}{\beta}\right), \quad (17)$$

illetve

$$\omega_{6,\text{kritikus}} = -\frac{\beta}{\Lambda} \quad (18)$$

és hogy a  $T$  periódusidőt helyesen megválasztva a

$$\varphi(t)dt \approx \varphi_6 e^{\omega_6 t} dt + bdt \quad (19)$$

közelítéssel élhetünk, tehát az analizátor által mért görbe egy exponenciális és egy háttér összegeként áll elő. Ennek ismeretében ilyen alakú függvény illesztésével az  $\omega_6$  időállandó értéke meghatározható. Ily módon különböző reaktorállapotokban kell mérni  $\omega_6$ -ot, amely adatokból extrapolációval határozhatjuk meg  $\beta/\Lambda$ -t valamint ezen keresztül 17. alapján a reaktivitást. Ezt nevezzük Simmons és King módszernek.

A Sjöstrand-féle kiértékelés leginkább abban különbözik az előzőekben bemutatott eljárástól, hogy esetében nem szükséges extrapolációt végezni, így a reaktivitás meghatározása egy mérés után lehetővé válik. A módszer lényege az a felismerés, hogy az időanalizátor által mért görbe egy állandó és egy csökkenő részből áll, melyek racionálisan a késő illetve prompt járuléknak feleltethetőek meg. A Sjöstrand módszer a reaktivitást a görbe alatti terület ezen két részének arányaként adja meg. A módszerekről bővebben lásd [8].

### 1.2.3. Inverz kinetika

A tárgyalt módszerek közül több szempontból kiemelkedik a reaktivitás inverz kinetikával történő meghatározása, hiszen nem csak azt teszi lehetővé, hogy bármely reaktorállapotban meghatározzuk a reaktivitást de ezen állapotok közötti átmenetek során is alkalmas a reaktivitás monitorozására. A fent ismertetett, kétszerezési idő módszere - mint említettem - körülbelül 0,3 \$-ig alkalmazható, egy szabályozórúd mozgása közben pedig nem, hiszen ekkor változik a rendszert jellemző kétszerezési idő. Előnyként fogható fel továbbá, hogy inverz kinetikával történő reaktivitásméréshez nem feltétlenül szükséges neutronforrás szubkritikus reaktorban sem.

## 2. fejezet - Az inverz kinetika kód bemutatása

### 2.1. Általános jellemzők

A rendelkezésemre álló, régebbi és új, rúdejtéses mérésekből származó adatok kiértékelése és az inverz kinetika módszerének alapos tanulmányozása céljából írtam egy olyan programot, amely az előbbieken túl alkalmas kiterjedt bizonytalanság- és érzékenységvizsgálat elvégzésére is.

A kód gerincét egy olyan függvény képezi, amely a tényleges inverz kinetikai számítást valósítja meg. A függvény számos bemeneti paraméterrel rendelkezik, melyek között megtalálhatóak a késő-neutron paraméterek, a neutrondetektorral mért beütésszámok és az időtömb is. A program ezekkel számolja a reaktivitást, majd grafikonon ábrázolja a beütésszámokat és a reaktivitásokat az egyes időpillanatokban. A kifejezetten a rúdértékesség számolására létrehozott programrész ezután adott intervallumra való átlagolást követően kiírja mind a szuperkritikus (ha van szuperkritikus szakasz), mind a szubkritikus reaktivitást, illetve ezek különbségeként a rúdértékességet. Ebben a fejezetben a kód bemutatása következik részletesen tárgyalva az implementált funkciókat és azok fizikai motívációját.

### 2.2. Neutrondetektorok holtidejének kezelése

#### 2.2.1. A holtidő fogalma

Egy detektor holtidejének nevezzük azt az időintervallumot, amelyen belül a detektor nem tud új eseményt regisztrálni. Másképp megfogalmazva létezik egy olyan véges idő, amelynek el kell telnie két esemény (beütés, részecske detektorba való érkezése) között, hogy a mérőrendszer két, egymástól elkülönülő eseményt érzékeljen. Emiatt a mérés során „elveszítünk” adatokat, amely veszteséget a számításaink során minden esetben figyelembe kell vennünk és korrigálnunk kell vele. A holtidő jelensége származhat a detektor felépítéséből vagy tipikusan a hozzá kapcsolt jelfeldolgozó elektronika véges képességeiből, illetve ezek együttes hatásából. A holtidő jelensége és kezelésének fontossága különösen hangsúlyos azokban az esetekben, amikor nagy számú, egymást gyorsan követő beütéseket mérünk. A holtidővel kapcsolatosan további részletekről a [18] irodalomban olvashatunk.

#### 2.2.2. A holtidőkorrekció különböző megvalósításai a detektortípustól függően

A detektorok holtidejének figyelembevételére több matematikai modell létezik a detektorok fizikai viselkedésétől függően.

Vannak olyan detektorok, amelyek esetében a legjobb megfontolás azt feltételezni, hogy az egyes beütések holtidejét nem nyújtják meg. Tehát abban az esetben, ha egy beütést követő holtidőn belül érkezik újabb részecske, ez nem növeli annak az időtartamnak a hosszát, amely alatt a detektor nem képes új regisztrációra. Azokat a detektorokat, amelyekre ez a leginkább érvényes elképzelés, nevezhetjük nem-halmozódó holtidejű (non-paralyzable) detektoroknak. Ebben az esetben egyszerű megfontolások útján a mért  $m$  beütésszámból és feltételezett  $\tau$  holtidőből a beütések valódi  $n$  számát az

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \quad (20)$$

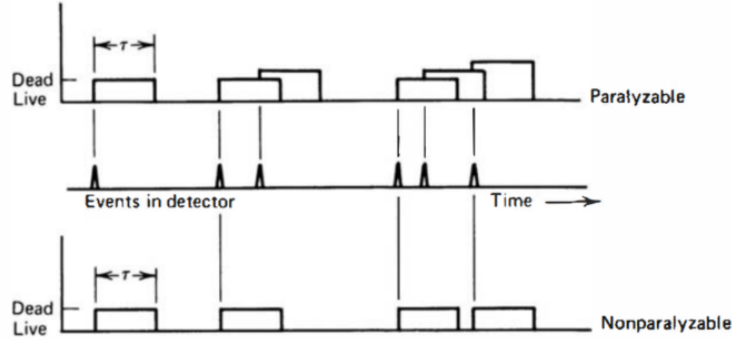
összefüggéssel becsülhetjük.

Más detektortípusok esetében a holtidők halmozódhatnak, tehát az előzővel ellentétben egy eseményt követő holtidőn belül beérkező részecske szintén  $\tau$ -val növeli a detektor halott (regisztrálásra képtelen) időszakát. A holtidő tekintetében az ilyen viselkedésű detektorokat nevezük halmozódó-holtidejű (paralyzable) detektoroknak. A beütések valódi számát ilyen esetben az előzőekben beve-

zetett  $m$  és  $\tau$  paraméterek függvényében az

$$m = n \cdot e^{-n\tau} \quad (21)$$

egyenlet  $n$ -re való megoldásával kaphatjuk, amely azonban iterációs módszert követel meg. A két detektormodell megértését segíti az 1. ábra.



1. ábra. Halmozódó (fent) és nem-halmozódó (lent) holtidejű detektormodellek (forrás: [18])

Végül akár halmozódó, akár nem halmozódó holtidejű detektorunk van (illetve bármely feltételezés igaz rá leginkább az adott mérésnél), abban az esetben, amikor a feltételezett holtidő reciprokához képest kevés beütésszám van, tehát, ha

$$n \ll \frac{1}{\tau}, \quad (22)$$

a két típus közel azonosan viselkedik

$$m \approx n(1 - n\tau), \quad (23)$$

amely a 20. és a 21. kifejezések 22. feltétel alapján történő Taylor-sorfejtéséből következik.

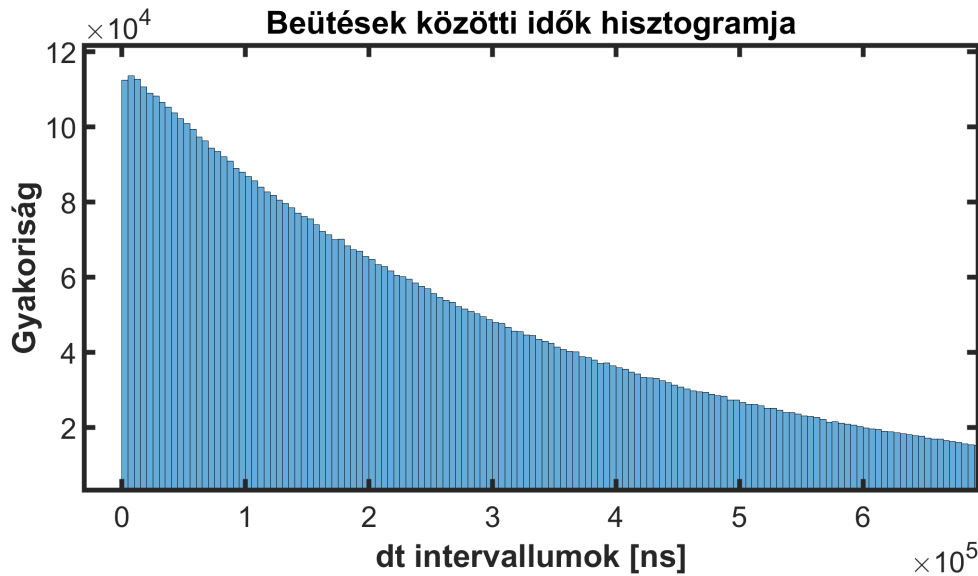
Fontos megjegyezni, hogy a bemutatott két viselkedés is csak egy-egy modell, a valóságban a detektor működési elvétől, felépítésétől és a mérés körülményeitől függően viselkedhet bonyolultabb módon, akár a két típus jellemzőit ötvözve is.

Az inverz kinetika kódban a leírt három eset mindegyikét implementáltam. A függvénynek bemeneti paraméterként meg lehet adni, hogy szeretnénk-e számolni holtidőkorrekcióval, továbbá, hogy milyen módszerrel és mekkora holtidővel. A program a 20. összefüggést az itt megjelenő módon, a 23. korrekciót pedig a másodfokú egyenlet megoldásával valósítja meg, ügyelve arra, hogy a képletekben dimenzióanalízis alapján időegységre vonatkoztatott beütésszámoknak kell szerepelniük. A 21. egyenletet intervallumfelezéses iterációs módszerrel oldottam meg, amely addig keresi  $n$ -t, amíg az egyenlet két oldalán szereplő kifejezések különbsége kisebb nem lesz  $10^{-10}$ -nél.

### 2.2.3. A holtidő becslése

Ahhoz, hogy a program képes legyen a tárgyalt módszerek bármelyikével korrigálni, szükség van a holtidő egy becsült értékére. Ennek megállapítása nem egyszerű, hiszen nem csak mérésenként vagy detektoronként, de egy detektorral történő mérés során is változhat a holtidő.

Munkám során ezt a becslést úgy végeztem, hogy számos mérési adatsor esetében vizsgáltam az egyes beütések között eltelt időket. Az egyes adatsorokhoz hisztogramokat készítve tanulmányoztam a beütések között eltelt idők gyakoriságát, majd ezeken a grafionokon kerestem azt az időtartományt, amely a lehető legrövidebb, ugyanakkor leggyakrabban volt az adatsorban. Egy ilyen hisztogramot láthatunk a 2. ábrán.



2. ábra. A holtidőbecsléshez használt histogramok egyike

## 2.3. Differenciál- és integrálszámítás

A 8. inverz kinetikai egyenletben szerepel deriválás és integrálás is, amelyek így szükségszerűen a programban is megjelennek. Ezeket valamilyen numerikus módszerrel kell implementálni, amire több megoldás létezik mindkét művelet esetében. A numerikus módszerek tanulmányozása során erősen támaszkodtam Faragó István és Horváth Róbert egyetemi jegyzetére [19] valamint Horváth Róbert előadás diasorára [20].

### 2.3.1. Numerikus deriválási lehetőségek

A deriválás numerikus elvégzésének egyik módja az ún. „backward”, tehát hátra mutató deriválás. Ennek lényege, hogy a deriváltfüggvény  $i$ -edik értékét úgy adja meg, hogy az  $i$ -edik és az  $(i-1)$ -edik pontokban felvett függvényértékek különbségét osztja az ekvidisztáns felosztás elemével. Ezzel minden pontban egy elsőrendű közelítéshez jutunk, amely értelmében ha a felosztás intervallumait felezzük (a felosztást finomítjuk), akkor a hiba is a felére csökken.

Egy másik megoldás során a deriváltfüggvény bármely  $i$  pontbeli értékét úgy számoljuk, hogy az  $(i+1)$ -edik és az  $i$ -edik pontban felvett függvényértékek különbségét osztjuk a felosztás elemével. Ezt előre mutató, „forward” deriválásnak nevezzük, amely az előzőhöz hasonlóan elsőrendű közelítés.

A harmadik, itt bemutatásra kerülő módszer nem más, mint a szimmetrikus, „central” derivált képzése. Ez az eljárás a deriváltfüggvény  $i$ -edik pontbeli értékét úgy közelíti, hogy az  $(i+1)$ -edik és az  $(i-1)$ -edik pontokban felvett függvényértékek különbségét osztja a felosztás elemének duplájával. A centrális numerikus deriválást gyakrabban alkalmazzák, hiszen egy bizonyos tartományon belül<sup>1</sup> ez másodrendű közelítést ad, azaz ha a felosztást a felére csökkentjük, a hiba a negyedére csökken.

Az inverz kinetika kód tartalmazza mindhárom deriválási módszer implementálását, melyek közül a paraméterlistában megadott számkóddal kiválasztható az adott számoláshoz használni kívánt módszer. A számolások döntő többségében a harmadik, centrális módszert alkalmaztam a pontossága miatt.

<sup>1</sup>A lépésszám-dilemma problémaköre ezzel a tartománnyal foglalkozik, ugyanis a felosztás finomításával egy határon túl növekedni kezd a hiba, így a lehető legkisebb hiba elérése a felosztás optimalizálási feladata.

### 2.3.2. Numerikus integrálási lehetőségek

Az integrálás numerikus implementálásának egyik módja, hogy összetett kvadratúraformulákat alkalmazunk. Ez különösen akkor hasznos, ha sok alappont van, amelyekhez ismerjük a függvényértékeket. Az összetett formulák lényege, hogy a teljes intervallumot felosztjuk és ezen alkalmazzuk a numerikus integrálás egyszerűbb módszereit, mint például a trapéz- vagy Simpson formulákat.

Ilyen például az összetett trapézformula, amely használatakor az integrálási tartományt  $n$  darab egyenlő részre osztjuk, majd az egyes tartományokon a trapézformulával kiszámolt integrálokat adjuk össze. A trapézformula egy függvény  $a$  és  $b$  közötti tartományon vett integrálját az  $a - b$  intervallum hosszának és a két ponthoz tartozó függvényértékek számtani közepének szorzataként adja meg. Az összetett trapézformula alkalmazásakor ügyelni kell arra, hogy az integrálási intervallum két végpontjához tartozó függvényértékeken kívül minden érték két oldalról is szerepel, így a széleken kívül eltűnik az  $1/2$ -es faktor. A formula által szolgáltatott eredmény a felosztás finomításával egyre tökéletesebb lesz.

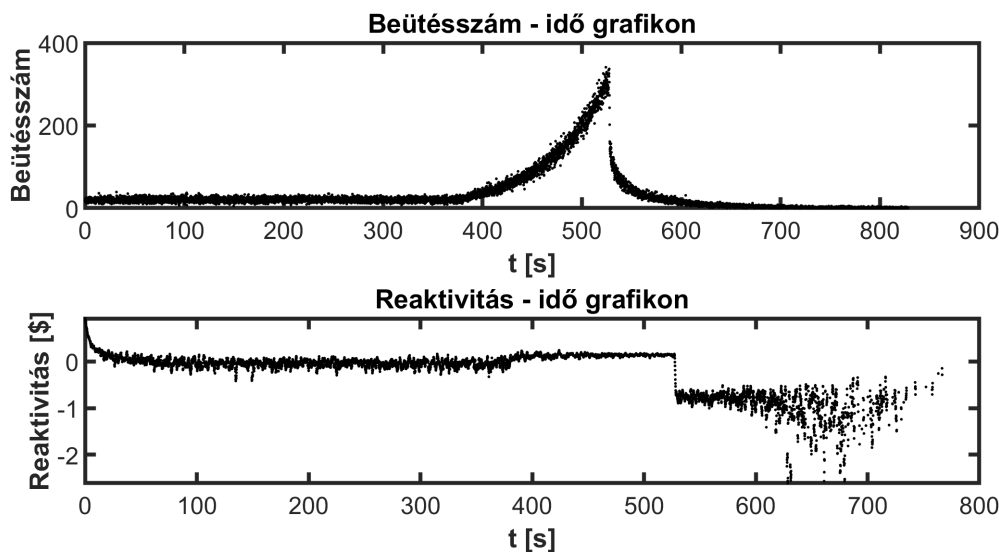
Szintén ilyen összetett integrálási megoldás az összetett Simpson-formula, amely az előző módszerhez hasonló, csak itt a trapéz formula helyett a Simpson-formulát alkalmazzuk az egyes tartományokon való integráláshoz, majd az eredményt ezen integrálok összegeként adjuk meg. A Simpson-formula hasonlít a trapéz-formulához, annyi különbséggel, hogy ennél nem csak az adott tartomány két széléhez tartozó, hanem a köztük lévő ponthoz tartozó függvényértéket is számításba vesszük különböző súlyfaktokkal.

A programban mindkét integrálási módszert elkészítettem és a deriválási művelet kiválasztásánál alkalmazotthoz hasonló kiválasztási funkciót hoztam létre. Az összetett trapézformulát egy az egyben, míg az összetett Simpson-formulát kis módosítással írtam meg. Ez azért van, mert ez utóbbit csak páratlan számú kis tartomány esetén lehetséges használni, így az összetett Simpson választása esetén is azokban az esetekben, amikor a tartományok száma páros, az összetett trapézformulát alkalmazom.

## 2.4. A reaktivitás grafikus ábrázolása és az értékek számolása

Miután a program bemeneti paraméterként fogadja a megfelelő adatokat - köztük az idő-beütés adatsorokat - elvégzi az inverz kinetikai számolást, amivel előállít egy új adatsort. Ennek elemei megfelelnek az időadatokhoz tartozó reaktivitásoknak, amiket ezután a program egy tízes mozgóátlaggal simít a plottolás előtt annak érdekében, hogy a mérés jellegzetes szakaszai - kritikus, majd esetleg szuperkritikus illetve a végén szubkritikus - határozottabban látszanak (a simítást csak az ábrázoláshoz alkalmaztam, a tényleges inverz kinetikai számolás során nem). Ezt követően a program osztott grafikonon ábrázolja mind a beütésszám, mind a reaktivitás adatpontjait az idő függvényében. Egy ilyen grafikont láthatunk a 3. ábrán.

Végül a reaktivitásértékek számolása következik az előállított adatsorból. Ehhez szükség van két intervallumra, amelynek pontjait a program átlagolja és ezek különbségeként értékeséget számol. Mind az ehhez felhasznált intervallumok nagysága, mind az adatsoron belüli elhelyezkedésük kiválasztható, hiszen a két tartomány négy határának mindegyike bemeneti paraméter. A kiszámolt értékeséget és az egyes tartományokon vett átlagolás eredményét a program kiírja, amellyel befejeződik az algoritmus végrehajtása.



3. ábra. A bementi beütésszám és a számolt reaktivitás adatsorok ábrázolása

## 2.5. Bizonytalanságbecslési lehetőségek

Az inverz kinetikai algoritmust megvalósító függvényen kívül több olyan segédprogramot írtam, amelyek segítik a vizsgálódást, hibaszámítást vagy bizonytalanságbecslést végeznek. Ezek lehetővé teszik a számoláshoz szükséges minden paraméter reaktivitásértékességre való hatásának egyenként történő vizsgálatát.

A rúdejtéses méréseket több paraméter bizonytalansága is terheli, úgy mint a későneutron-hányadok, a holtidő valamint a generációs idő hibája. Az adatok korrekt kiértékelése megköveteli ezen bizonytalanságok figyelembevételét. Az erre szolgáló analitikus megoldások kezelése sokkal bonyolultabb, mint az a módszer, amit én használok. Ez utóbbi nem más, mint az angol irodalomban „Monte Carlo propagation”-ként megnevezett, nagy számú, Monte Carlo elvű mintavételezésen alapuló, bevett (ld. [21]) eljárás. Ennek lényege, hogy egy eloszlást és egy szórást feltételezek az egyes paramétereknek (ami jellemzően normális vagy Poisson-eloszlás), majd ezekből az eloszlásokból mintavételezett paraméterekkel számolok eredményt tetszőleges alkalommal. A kapott végeredmények eloszlásának (normális-eloszlás) 1 szigma hibáját tekintem a számoláshoz rendelhető bizonytalanságnak.

## 2.6. A program működésének ellenőrzése

A fentiekben ismertetett kód helyes működését egy régebben, Dr. Szatmáry Zoltán professzor által ilyen célra készített, FORTRAN nyelvű, a Nukleáris Technikai Intézetben általánosan elfogadott kóddal ellenőriztem le. Az inverz kinetikai megoldó program, amely a kapcsolódó [9] tanulmány alapján készült, eredményét összehasonlítottam a saját kódom által számolttal, azonos bemeneti paraméterek és adatok mellett. A vizsgálatok alapján a két kód reaktivitás végeredményei között maximum tizedcent eltérés volt, amelyet megnyugtató egyezésként könyveltem el.

Az elkészült program első futtatásai után a számolt szuperkritikus reaktivitások helyességét úgy is ellenőriztem, hogy exponenciális függvényt illesztettem arra a szuperkritikus szakaszra, amelynél már a mozgatórúd biztosan kint volt a zónából és az illesztés paraméteréből meghatározott  $\omega$  időállandóval a 11. reciprokóra egyenlet segítségével reaktivitást számoltam. Az eredmények jó egyezést mutattak a megfelelő inverz kinetikával számolt értékekkel, ily módon is megbizonyosodtam tehát

az algoritmus helyes implementálásáról.

## 3. fejezet - Rúdejtéses mérések

### 3.1. A mérés elve

A rúdejtéses mérések célja a reaktorban megtalálható neutronabszorbens rudak reaktivitásértékességének meghatározása. Ilyenek például a kézi és automata szabályozórudak, illetve az egyes biztonságvédelmi rudak is [22]. Ezek szerepe eltérő [23], azonban mindegyik esetén szükség van az értékesség ismeretére a biztonságos üzemeltetéshez.

Az ilyen típusú méréseknek többféle változatuk van attól függően, hogy milyen állapotban van a reaktor a rúdejtés pillanatában. A mérés megkezdése előtt kicsatoljuk a megfelelő detektorok jeleit, illetve összeállítjuk az adatok fogadására alkalmas mérőeszközöket, és csatlakoztatjuk őket a számítógéphez. A mérés stabil kritikus állapotból indul. A reaktort kritikus állapotban tartjuk kb. 10 percig, hogy a későneutron-anyamagok felvegyék egyensúlyi koncentrációjukat (ld. Levezetés alfejezet vége). Ezt követően kétféle forgatókönyv valósulhat meg:

1. Közvetlen a kritikus állapotból történik meg a mérendő rúd zónába ejtése, melynek hatására erős teljesítménycsökkenés következik be. A rúdejtést követően még várunk pár percet, majd leállítjuk a reaktort.
2. A másik (pl. a 3. ábrán látható) esetben a kritikus szakasz után rúdmozgatással 10-20 cent reaktivitást viszünk a rendszerbe, mellyel szuperkritikus állapotba kerül a reaktor. Engedjük növekedni a teljesítményt, majd egy tervezett érték elérésekor ejtjük le a rudat, amely következményeként lecsökken a teljesítmény és ismét leállítjuk a reaktort.

A mérés során monitorozott beütésszámok szolgálnak mérési adatként a reaktivitás számolásához, majd ebből határozhatjuk meg az adott rúd értékességét.

### 3.2. Az Oktatóreaktorról röviden

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem területén, az R és a D épületek találkozásánál helyezkedik el az Oktatóreaktor, amely elsőként 1971. május 22-én vált kritikussá, tehát idén 50 éves [24]. Elsődleges célja a nukleáris területen magasan képzett szakembergárda kinevelése, illetve az országban működő nukleáris létesítményekhez szükséges emberi erőforrások megteremtése. A reaktor kutatási célokat is szolgál, a Nukleáris Technikai Intézet számos tanulmánya, publikációja az itt folytatott munkákból, mérésekből készül, illetve felhasználja az Oktatóreaktorban szerzett tapasztalatokat, eredményeket. Néhány ilyen publikáció elérhető a [25, 26, 27, 28] hivatkozásokon.

A vízzel hűtött és moderált Oktatóreaktor eredeti termikus teljesítménye 10 kW volt egészen 1980-ig, amikor egy további üzemanyagkazetta behelyezésével megemelték ezt 100 kW-ra. Az alumínium ötvözetből készült szerkezeti elemekkel rendelkező reaktor aktív zónája 24 darab, EK-10 típusú üzemanyagkazettából épül fel, az ezekben található üzemanyag pedig 10% dúsítású urándioxid. Az aktív zónában összesen 369 üzemanyagpálca helyezkedik el. A reaktorban reflektorként grafitot és vizet használnak. A reaktortartály 1 cm falvastagságú, 6 méter magas, 1,4 méter átmérőjű alumínium henger, amely felülről nyitott, így tehát az elrendezés medence típusú. A tartályt kitöltő sótalanított víz látja el a felső biológiai sugárvédelmet is. A reaktortartályt veszi körül a betonból készült reaktortömb, amely az oldal irányú sugárvédelemért felel. A reaktor fontos elemei a zónában és reflektorban kialakított besugárzó csatornák, illetve fontos kísérleti berendezés a speciális kialakítású, oldalsó védelmen áthatoló, nagy méretű besugárzó alagút. A neutronabszorbens rudak közül 2 bór-karbidból készült biztonságvédelmi rúd, 1 ugyanilyen anyagú kézi szabályozórúd, valamint

1 kadmiumozott acélból készült automata teljesítmény-szabályozó rúd. A tanreaktor történetéről, felépítéséről és műszaki adatairól részletesebben a [28, 29, 30, 31] hivatkozásokon olvashatunk.

### 3.3. Korábbi mérések

A kiértékelés során felhasznált adatsorok közül néhány a 2016-os Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat előtti, Horváth András által végzett mérésekhez tartozik. Az ekkor végzett mérések biztonságvédelmi és szabályozórudak értékességének meghatározására irányultak, melyek közül én a szabályozórudak ejtéseinek adatait értékeltem ki. A mérések körülményeit az akkor készült leíratból ismertem meg [32].

Ezeknél a méréseknél még a régebbi LND detektort alkalmazták az Oktatóreaktorban, amelyet használat előtt be kellett helyezni egy függőleges száraz csatornába, amely a reaktortartályban a besugárzó alagúthoz csatlakozott. Ebben az esetben a detektort 129 cm-el a csatorna alja fölött rögzítették. A mérőeszköz pontos megnevezése LND 23210 detektor [33], amely argon töltőgázú proporcionális számláló 96%-os dúsítású  $^{10}\text{B}$  bevonattal a falán, amely bevonat felületi sűrűsége  $0,5 \text{ mg/cm}^2$ . A detektor tápfeszültségét a mérések során 750 V-nak választották meg, az adatok gyűjtését pedig a GENIE program végezte 0,2 szekundumos időintervallumokhoz rendelve beütésszámokat.

A beállított detektorral az automata szabályozórúd mérésénél a reaktort 15 percig kritikus állapotban tartották automata üzemmódban,  $0,2 \text{ W}$  teljesítményen. Ezt követően áttértek kézi vezérlésre, az automata rudat teljesen kihúzták a zónából, a kézi rudat eközben 400 mm-en tartották. Ez azt eredményezte, hogy a reaktor szuperkritikus állapotba került, tehát növekedett a teljesítménye. Amikor ez elérte az  $1,3 \text{ W}$ -ot, a másodoperátor a kulcsos kapcsoló elfordításával a zónába ejtette az automata rudat.

A kézi szabályozórúd esetében a mérés előtt teljesen kihúzták azt a zónából, majd automata üzemmódban az előzőekhez hasonlóan 15 percig tartották fenn a kritikus állapotot. Eközben az automata szabályozórúd 180 mm-en állt. A kritikus szakasz után kézi vezérlésen kijebb húzták az automata rudat 300 mm-re, így a teljesítmény növekedni kezdett, amelyet ez esetben is  $1,3 \text{ W}$ -ig engedtek meg. Ennek elérésekor ejtették le a kézi rudat. Mind az automata, mind a kézi szabályozórúd mérését kétszer végezték el. A később bemutatásra kerülő februári és szeptemberi mérések menete ezzel azonos volt.

Az Oktatóreaktorban a CFUL08-as típusú hasadási kamra telepítése ezen mérések napjaiban volt folyamatban, így lehetőség adódott az új mérőműszer kipróbálására annak végleges elhelyezése és beállítása előtt. Az elvégzett mérések mindegyikét megismételték az új detektorral, amelyet szintén a száraz besugárzó csatornába helyeztek, csak ezúttal annak aljára. A mérések menete az LND-s mérésekhez hasonló volt, kivéve, hogy a teljesítményt  $1,6 \text{ W}$ -ig engedték növekedni a szuperkritikus szakaszban.

Ezen felül a 2021. február 23-án és 25-én végzett, Ványi András Szabolcs által vezetett rúdejtéses mérések adatait is feldolgoztam. Ezeket szintén az Oktatóreaktorban végezték, a lebonyolításban és az adatgyűjtésben Klujber Gergely segített. A mérések menete gyakorlatilag megegyezett a Horváth András által végzett LND-detektoros mérésekkel, kivéve, hogy ezúttal a mérőláncba beépített CFUL08 detektorok jeleivel dolgoztak.

### 3.4. Saját méréseim

2021. szeptember 20-án az Oktatóreaktorban végeztünk rúdejtéses méréseket, melyek menete hasonló volt a februári mérésekéhez annyi különbséggel, hogy ezúttal én is jelen voltam. Ezen a napon az automata és a kézi szabályozórudak értékességének meghatározása céljából 3 - 3 mérést végeztünk, amelyből mindkét rúdnál kettő a már bemutatott régi mérésekhez hasonló módon tör-



	<b>Időpont</b>	<b>Esemény</b>
<b>Automata rúd 1. mérés</b>	9:31	A reaktor elindítása
	9:45	1 W teljesítmény elérése
	9:50	Mérés kezdete
	10:00	Automata rúd kihúzása, teljesítménynövekedés 5 W-ig, ott automata ejtése
<b>Automata rúd 2. mérés</b>	10:12	0,5 W-os teljesítményen kritikus szakasz kezdete
	10:29	Automata rúd teljes kihúzása (600 mm), teljesítménynövekedés 5 W-ig, ott automata ejtése, nem esik le azonnal, csak 6,5 W-nál
	10:44	0,5 W-os teljesítményen kritikus szakasz kezdete
<b>Kézi rúd 1. mérés</b>	10:55	Automata rúd húzása 300 mm-re, majd kézi ejtése 5 W-nál, nem esik le azonnal, csak 6,4 W-nál
	11:08	0,5 W-os teljesítményen kritikus szakasz kezdete
<b>Kézi rúd 2. mérés</b>	11:19	Automata rúd húzása 300 mm-re, majd kézi ejtése 5 W-nál, nem esik le azonnal, csak 5,4 W-nál
	11:25	Teljesítmény növelésének kezdete
<b>Kézi rúd ejtése kritikus állapotban</b>	11:32	10 W elérése, kritikus szakasz kezdete
	11:45	Kézi rúd leejtése
	11:50	Teljesítmény növelésének kezdete
<b>Automata rúd ejtése kritikus állapotban</b>	11:56	10 W elérése, kritikus szakasz kezdete, kézi vezérlésen automata rúd kint, 10,2 W tartása kézzel
	12:07	Automata rúd ejtése

1. táblázat. Mérési időnapló 2021.09.20.

tént, egy-egy pedig kritikus állapotban történő rúdejtés volt. Az új méréseknél természetesen már a CFUL08-as hasadási kamrával és a hozzá tartozó mérőlánccal dolgoztunk, amely jellemzője, hogy holtideje nanoszekundum nagyságrendű<sup>2</sup>, a rendszer beállításával 0,1 szekundumonként rögzíti az adatokat és az LND-nél sokkal több beütést képes regisztrálni. A detektorról további információkat találhatunk a gyártó cég honlapján [35]. MyRIO feldolgozóegység alkalmazásával minden beütéshez időbélyeget rendeltünk, amiből később ezen időbélyegek megfelelő (0,1 vagy 1 szekundumos binézésével) állítottuk elő a kiértékelhető adatsorokat. Az adatokat a helyszínen a GENIE program segítségével ábrázoltuk. A mérésről a helyszínen készítettem egy időnaplót, ennek tartalma szerepel az 1. táblázatban.

Az 1. táblázatban észrevehetünk olyan feljegyzéseket, melyek szerint egyes rúdejtéseknél nem tudtuk pontosan a tervezett teljesítmény elérésekor beejteni az adott rudat. Ez annak köszönhető, hogy ezekben az esetekben a kulcsos kapcsolót nem fordították el teljes végállásba a kért teljesítménynél, így pár másodperccel később (ezúttal teljesen elfordított kapcsolónál) esett le a rúd.

<sup>2</sup>Az LND detektorok holtidejét a régi mérések kiértékelésekor  $\sim 17 \mu\text{s}$ -ra becsülték [34].

## 4. fejezet - Mérések kiértékelése

### 4.1. Korábbi mérések

#### 4.1.1. 2021.02.23. - Kiértékelés

A rendelkezésemre álló mérési adatsorok közül elsőként a 2021. február 23-ai mérésekhez tartozókat értékeltem ki. Ezek egy automata- és egy kézi szabályozórúd mérései, melyek közül mindkettőhöz két adatsor tartozik, hiszen az I1 és I2 mérőlánccok detektorainak jeleit is kicsatoltuk, így ezekkel szimultán gyűjtöttünk adatokat.

Mielőtt a rúdértékességet meghatároztam volna, az egyes adatsorok esetén meg kellett állapítanom, hogy mely tartományokon átlagoljak. Ennek rögzítése kulcsfontosságú a számolás paraméterei között, hiszen a tesztelések során arra a következtetésre jutottam, hogy ennek változtatása jelentősen befolyásolja a végeredményt. A vizsgálódásom során megpróbálkoztam az átlagolási intervallumok automatikus legenerálásával is, tehát írtam egy olyan kódresztletet, amely az adott adatsorhoz bizonyos feltételekkel meghatároz egy olyan időintervallumot, amelyre átlagolva a kód automatikusan kiszámolja a szuperkritikus vagy kritikus, illetve szubkritikus reaktivitásokat. Ezt a módszert azonban végül a kiértékelésnél elvettem, hiszen minden adatsor különböző, így specifikusan kell ezen intervallumokat kiválasztani annak érdekében, hogy a lehető legpontosabb és fizikailag leginkább helytálló kiértékelést végezzem. Adatsorra szabottan ugyanis könnyebb minnél több jó pontot bevinni az átlagolásba, ezzel javítva a statisztikát. Így tehát a dolgozatban szereplő összes kiértékelt adatsor átlagolási intervallumait „kézzel” állapítottam meg, amely azt jelenti, hogy lefuttattam az inverz kinetika kódot az adatsoron, majd a kapott reaktivitás grafikonon alaposan tanulmányoztam a mérés egyes szakaszait és ezek alapján határoztam meg a legjobbnak ítélt szuperkritikus, illetve szubkritikus tartományokat. Ezt úgy végeztem, hogy a rúdejtés pillanatától mind a szuperkritikus, mind a szubkritikus tartományok irányában kihagytam 5 másodpercet, amely a szuperkritikus tartomány végét illetve a szubkritikus tartomány elejét határozta meg. Ugyanakkor a szuperkritikus tartománynál az átlagolási intervallum kezdetét 40 szekundummal (a kézi rúd mérésénél 50 s volt ez az érték, ezek konzervatív becslések) később vettem fel attól a pillanattól, ahol a rendszer már egészen biztosan szuperkritikus volt. Az említett időintervallum elhagyása azért indokolt, mert ennyi idő kell ahhoz, hogy a rudat teljesen kihúzzuk az aktív zónából. Ennek a szakasznak az elhagyása tehát azt garantálja, hogy az általunk szuperkritikus szakasznak mondott, kiátlagolt tartomány valóban ahhoz az időintervallumhoz és reaktorállapothoz tartozzon, amikor a teljes rúd kint volt. A szubkritikus tartomány végét igyekeztem úgy felvenni, hogy körülbelül a kezdeti kritikus beütésszintig átlagoljak, a mérés végén bekövetkező, radikálisan szóró szakaszt lehetőleg kihagyjam, ugyanakkor elég adatpontot tartalmazzon az intervallum.

A február 23-ai mérésekhez tartozó átlagolási intervallumokat is az imént leírt módon állapítottam meg, amelyekből tehát a 4 adatsorhoz összesen 2 volt szükséges, hiszen az automata vagy kézi rúd méréséhez tartozó két mérőlánccal felvett adatsorhoz ugyanaz az időskála tartozott. Ezután rögzítettem a számolás egyéb paramétereit is, amiket az átláthatóság kedvéért a 2. táblázatban rendszereztem. A számoláshoz felhasznált későneutron paraméterek 8-csoport szerkezetűek, az effektív későneutron-hányadok esetében a Serpent 2 Monte Carlo kód által a JEFF 3.1.1 könyvtár alapján, az Iterated Fission Probability (IFP) módszerrel számolt értékeket használtam [36]. Ezek számítását a Ványi András Szabolcs által készített, az Oktatóreaktort modellező Serpent kóddal tudtuk elvégezni.

A táblázatban szereplő adatokkal minden esetben kétféleképpen is lefuttattam az inverz kinetikai megoldót. Elsőként a detektor beütéseit tizedszekundumos, majd 1 szekundumos binezéssel kezelve. Az eredményeket a 3. táblázatban tekinthetjük meg.

Amint láthatjuk, mind az automata, mind a kézi szabályozórúd esetében a különböző mérőlánccok illetve binezések esetén kissé eltérő eredményt kaptam. A különböző mérőlánccok adatai által szolgáltatott eredmények eltérése feltehetően a detektorok által érzékelt beütések nagyságrendbeli

Közös paraméterek

Generációs idő [s]	$\Lambda=6,887e-5$
Effektív későneutron hányadok [-]	$\beta_{eff}=[2,607e-4 \ 1,161e-3 \ 7,283e-4 \ 1,529e-3 \ 2,536e-3 \ 7,26e-4 \ 6,43e-4 \ 1,90e-4]$
Bomlási állandók [1/s]	$\lambda=[1,247e-2 \ 2,829e-2 \ 4,252e-2 \ 1,330e-1 \ 2,925e-1 \ 6,66e-1 \ 1,63 \ 3,55]$
Numerikus deriválás módszere	Centrális deriválás
Numerikus integrálás módszere	Vegyés (összetett Simpson és összetett trapéz módszer)
Holtidőkorrekció módszere	Halmazódó holtidejű modell
Holtidő becsült értéke (CFUL08 detektor) [ns]	150

2. táblázat. Számolási paraméterek a 2021.02.23-ai automata és kézi rúd méréseinek kiértékeléséhez

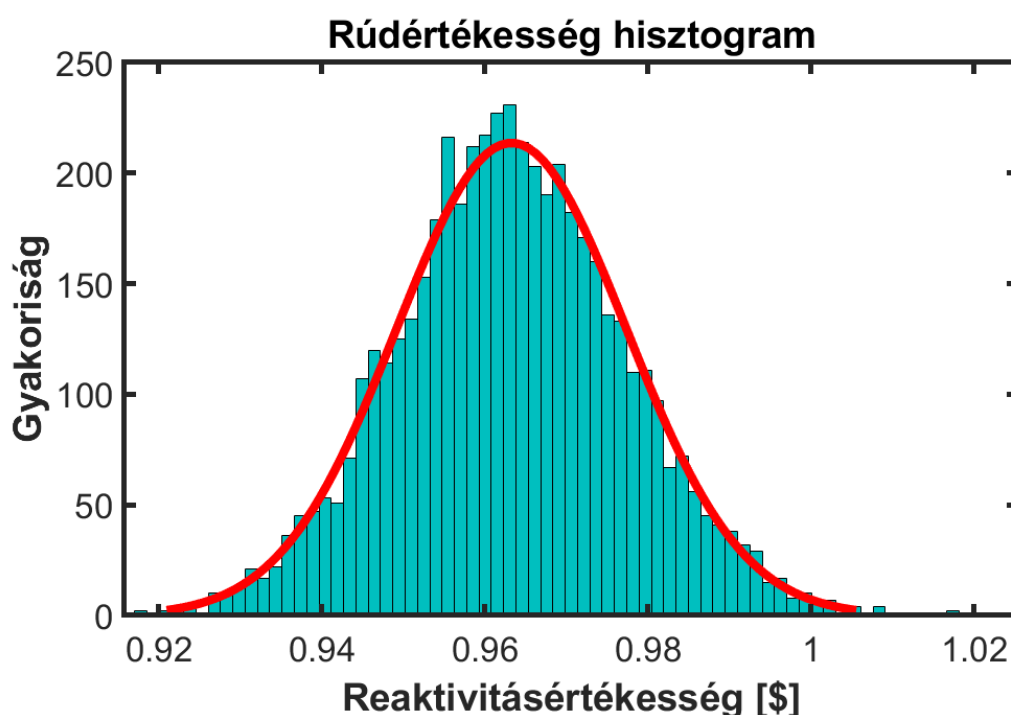
	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Szuperkritikus reaktivitás átlag [\\$]	Szubkritikus reaktivitás átlag [\\$]	Rúdértékesség [\\$]
Automata rúd	<b>I1</b>	<b>0,1</b>	0,136	-0,775	<b>0,911</b>
	<b>I1</b>	<b>1</b>	0,115	-0,756	<b>0,871</b>
	<b>I2</b>	<b>0,1</b>	0,141	-0,725	<b>0,865</b>
	<b>I2</b>	<b>1</b>	0,115	-0,736	<b>0,852</b>
Kézi rúd	<b>I1</b>	<b>0,1</b>	0,230	-1,647	<b>1,877</b>
	<b>I1</b>	<b>1</b>	0,203	-1,586	<b>1,789</b>
	<b>I2</b>	<b>0,1</b>	0,231	-1,679	<b>1,910</b>
	<b>I2</b>	<b>1</b>	0,205	-1,686	<b>1,891</b>

3. táblázat. A 2021.02.23-ai mérés kiértékelésének eredményei

különbségének köszönhető. A beütések bizonyos időintervallumra való összegzése két ok miatt is előnyös. Egyrészt ezáltal gyorsabban fut a program, hiszen az összeajtással lényegében csökkentjük annak a tömbnek a hosszát, amellyel az számol. Ez a különbség nagyon jelentős, egy 15-16 órás gépidőt körülbelül 15-20 percre lehet csökkenteni. Ez érthető, hiszen például egy tizedszekundumos időkülönbséggel felvett adatsor szekundumosra való átírása az adatsor elemeinek számát megtizedeli. Másrészt azt tapasztaltam, hogy nagyobb beütésszámoknál pontosabb a módszer, tehát az összevonás javít az eredményen. Ugyanakkor azonban fontos megjegyezni, hogy ennek hatása negatívra is fordulhat, hiszen a túlzott összevonással romlik a felbontás, így elkenjük az effektust.

#### 4.1.2. 2021.02.23. - Bizonytalanságbecslés

A korábbi mérések kiértékeléseihez tartozó bizonytalanságbecsléseket az elsőként tárgyalt 2021. február 23-ai mérésekkel kezdtem. A számolt reaktivitásértékeségek bizonytalanságát úgy becsültem, hogy a rúdértékességet befolyásoló tényezők mindegyikét változtattam egy ciklus belsejében és minden esetben számoltam értékességet az inverz kinetika kóddal. A paramétereket azok feltételezett eloszlásaiból mintavételeztem Monte Carlo elvek alapján, majd a számolt rúdértékességeknek normális-eloszlást feltételezve vizsgáltam ennek félértékessélességét és ez alapján becsültem a végeredmény 1 szigma szórását. A hibabecslési eljárás során 5000-es ciklusszámmal futtattam a releváns kódrészletet. Azt is megvizsgáltam, van-e szükség a bizonytalanság nagyobb ciklusszámmal történő becslésére, melynek során azt kaptam, hogy 5000 ismétlés fölött a kapott szórás illetve az eloszlás várható értéke gyakorlatilag semmit sem változik. Az 5000 rúdértékességet ezután hisztogramon ábrázoltam, majd erre Gauss-görbét illesztettem egy olyan parancs segítségével, amely egyúttal kiszámolja a félértékessélességhez tartozó szórást és az eloszlás várható értékét. A 4. ábrán láthatunk egy ilyen hisztogramot a rá illesztett Gauss-görbével együtt.



4. ábra. Példa a bizonytalanságbecslés során felhasznált hisztogramokra: a paraméterek változtatásával számolt 5000 rúdértékesség elemeinek gyakoriságát láthatjuk. Ez a hisztogram a 2021.02.23-ai automata rúd II méréséhez tartozik tizedszekundumos binezéssel.

A végeredményt befolyásoló egyes paraméterek hibáit, amelyekkel a bizonytalanságbecslést végeztem, az 5. táblázatban tekinthetjük meg. A holtidő hibáját a leírt megfontolások (ld. A holtidő becslése alfejezet) hibájaként becsültem a CFUL08-as detektorhoz, a  $\beta_{eff}$  bizonytalanságát a [37] irodalomból vettem át, a generációs idő hibáját pedig az Oktatóreaktorhoz valaha számított értékek alapján becsültem. A bizonytalanságbecslés egy eleme tehát annyiból állt, hogy mindegyik paramétert a feltételezett, előbb említett szórással jellemezhető normális eloszlásból mintavételeztem, majd az így előállított aktuális paraméterlistával számoltam rúdértékességet. A rúdértékességekre Gauss-görbét illesztve becsültem a számolás végeredményének 1 szigma szórását. Fontos, hogy a többi paramétertől eltérő módon, a beütésadatokat úgy perturbáltam, hogy az adott időpillanathoz tartozó  $\lambda$  beütésszámot egy  $\lambda$  paraméterű Poisson-eloszlásból mintavételezett véletlen számmal helyettesítettem.

Mielőtt az első ilyen eljárást megvalósítottam, számos olyan műveletet is végeztem, amelynek során csupán egyetlen paraméter bizonytalanságát vizsgáltam, a többit fix értéken tartottam. Ezek szolgálták kiindulási alapul a bizonytalanságbecslés teljes egészének kialakításához, hiszen a változtatott tényezők számának növelésével egyre közelebb kerültem a végeredményként számolt reaktivitásértékesség hibájának legpontosabb becsléséhez.

Ezek a számítások egyben a reaktivitásértékesség egyes paraméterekre való érzékenységvizsgálatai, ezért segítségükkel megadható az értékességhez rendelt bizonytalanság paraméterenkénti eloszlása. Ennek bemutatása érdekében a február 23-ai, automata rúd II mérőlánccal történő méréséhez végeztem érzékenységvizsgálatot. Ennek keretében vizsgáltam a későneutron-hányadok, a holtidő és a generációs idő változtatásának hatását a rúdértékességre illetve megnéztem azt is, hogy a beütésszámok említett perturbálása milyen eltérést eredményez. Az egyes paraméterek változtatásának eredményeként kapott szórásokat a 4. táblázatban tüntettem fel.

Változtatott paraméter	Rúdértékesség szórása [ç]
$\beta_{eff}$	1,400
Holtidő	0,009
Generációs idő	0,019
Beütésszámok	0,800

4. táblázat. A reaktivitás egyes paraméterekre való érzékenysége vizsgálata során kapott szórások

A táblázatból láthatjuk, hogy míg a holtidő vagy a generációs idő változtatásának csekély hatása van a reaktivitásértékességre, nem mondható el ugyanez a későneutron-hányadokra vagy a beütésszámokra. A bizonytalanságbecslésnél tehát a szórás nagy része utóbbiakból származik.

Fontos kiemelni, hogy az átlagolási intervallum változtatása, vagy az adatsorokon alkalmazott simítás is jelentősen befolyásolják a végeredményt. A simítással külön foglalkoztam, vizsgáltam, hogy alkalmazható-e illetve szükséges-e alkalmazni simítást vagy mozgóátlagot, majd arra jutottam, hogy az inverz kinetika problémájának erősen nemlineáris volta miatt kihagyom azt. Az átlagolást is alaposan tanulmányoztam, majd a már fentebb részletezett módszert - miszerint minden adatsorhoz külön-külön kell megadni a tartományokat - ítéltem a legjobbnak.

Effektív későneutron hányadok becsült hibái [-]
5,14e-06   2,28e-05   1,34e-05   3,14e-05   3,07e-05   2,72e-05   2,99e-05   9,44e-06
Holtidő becsült hibája: 50 ns
Generációs idő becsült hibája: $3 \cdot 10^{-5}$ s

5. táblázat. A reaktivitásértékességet befolyásoló paraméterek bizonytalanságbecsléshez felhasznált hibái

A 23-ai mérések bizonytalanságbecslésének eredményeit a 6. táblázatban láthatjuk. Ebben, és a bizonytalanságbecslés eredményeit feltüntető későbbi táblázatokban (8., 9., 13. táblázatok) is a várható érték és szórás a Monte Carlo mintavételezés során kapott 5000 rúdértékesség (normálissal közelített) eloszlásának várható értékét és 1 szigma szórását jelenti. Ebben megfigyelhető, hogy a szekundumos binezés esetén mindkét rúdnál a perturbálatlan számolás eredményéhez jelentősen közelebb van a bizonytalanságbecslés során kapott eloszlás várható értéke, amely alátámasztja az adatpontok összevonásának köszönhető, már részletezett feltevését. Ezt belátva a későbbiekben szekundumos binekkel dolgoztam.

	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Rúdértékesség [\\$]	Várható érték [\\$]	Szórás [\\$]
Automata rúd	I1	0,1	0,911	0,963	<b>0,014</b>
	I1	1	0,871	0,875	<b>0,011</b>
	I2	0,1	0,865	0,880	<b>0,009</b>
	I2	1	0,852	0,853	<b>0,008</b>
Kézi rúd	I1	0,1	1,877	1,981	<b>0,045</b>
	I1	1	1,789	1,796	<b>0,031</b>
	I2	0,1	1,910	1,942	<b>0,025</b>
	I2	1	1,891	1,894	<b>0,022</b>

6. táblázat. A számolt rúdértékességekhez rendelt bizonytalanságok és az eloszlások várható értékei - 2021.02.23.

#### 4.1.3. 2021.02.25. - Kiértékelés

2021. február 25-én az automata és a kézi szabályozórúd reaktivitásértékességének meghatározása céljából készült mérési adatokat is kiértékeltem. Ezeknél a méréseknél mind az automata-, mind a kézi szabályozórúd mérése alatt 20 °C volt a moderátorvíz hőmérséklete. A felhasznált bemeneti paraméterek a 2. táblázatban foglaltakkal megegyeznek, az átlagolási intervallumokat pedig ezekre az adatsorokra is külön kiválasztottam. A kiértékelést a 23-ai adatokhoz hasonlóan, azonban már csak másodperces binezéssel végeztem, az eredményeket a 7. táblázatban foglaltam össze.

	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Szuperkritikus reaktivitás átlag [\\$]	Szubkritikus reaktivitás átlag [\\$]	Rúdértékesség [\\$]
Automata rúd	<b>I1</b>	<b>1</b>	0,115	-0,754	<b>0,869</b>
	<b>I2</b>	<b>1</b>	0,116	-0,738	<b>0,854</b>
Kézi rúd	<b>I1</b>	<b>1</b>	0,201	-1,624	<b>1,825</b>
	<b>I2</b>	<b>1</b>	0,205	-1,708	<b>1,913</b>

7. táblázat. A 2021.02.25-ei mérés kiértékelésének eredményei

#### 4.1.4. 2021.02.25. - Bizonytalanságbecslés

Ebben az esetben is végeztem a kapott reaktivitásértékesség bizonytalanságára vonatkozó számolásokat az előzőekben leírtakhoz hasonlóan és a paraméterek ugyanazon becsült hibáit felhasználva (5. táblázat). Az eredmények a 8. táblázatban tekinthetők meg.

	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Rúdértékesség [\\$]	Várható érték [\\$]	Szórás [\\$]
Automata rúd	I1	1	0,869	0,873	<b>0,011</b>
	I2	1	0,854	0,855	<b>0,009</b>
Kézi rúd	I1	1	1,825	1,834	<b>0,030</b>
	I2	1	1,913	1,916	<b>0,021</b>

8. táblázat. A számolt rúdértékességekhez rendelt bizonytalanságok és az eloszlások várható értékei - 2021.02.25.

A február 23-ai és 25-ei mérések azonos feltételek mellett lettek elvégezve. A kapott inverz kinetika eredmények ezzel összhangban vannak, az egyes eredmények a becsült 1 szigma hibán belül megegyeznek.

#### 4.1.5. LND detektoros mérések kiértékelése és az eredmények hibabecslése

A legrégebbi mérések, melyek adatait feldolgoztam, a már részletezett, 2016-os IBF előttié, amiket Horváth András végzett. Ezek kiértékelése során arra kellett figyelni, hogy az LND detektornál a beütések 0,2 szekundumos időintervallumokhoz tartoznak (így a szekundumos binék eléréséhez 5 egymás melletti tartományt kellett összegezni), valamint, hogy a holtidő becsült értéke  $17 \mu\text{s}$  ([32] alapján). Itt még nem volt I1 és I2 mérőlánc, így csupán három adatsorunk van: 1 az automata rúdhoz, 2 pedig a kézi szabályozórúdhoz tartozik. Az eredményeket és azok bizonytalanságát a 9. táblázat tartalmazza.

	$\Delta t$ [s]	Rúdtértékesség [\\$]	Várható érték [\\$]	Szórás [\\$]
AUT1_LND	1	0,857	0,859	<b>0,016</b>
KEZI1_LND	1	1,915	1,922	<b>0,040</b>
KEZI2_LND	1	1,914	1,921	<b>0,039</b>

9. táblázat. Az LND detektoros mérések eredményei - értékesség, várható érték és szórás

A 9. táblázatban láthatjuk, hogy az LND detektorral történt mérések eredményei 1 szigmán belül megegyeznek a februári mérések eredményeivel.

#### 4.1.6. A régebbi CFUL mérések tapasztalatai

Amint említettem, az LND detektoros méréseket követően lehetőség volt az éppen beszerelésre kerülő CFUL08-as hasadási kamrával is méréseket végezni. A mérési adatsorokban azt vették észre, hogy a szubkritikus szakaszban egy törés keletkezett a reaktivitásban. Ennek oka a jelentés [32] szerint, hogy a mérőrendszer bizonyos beütésszámok fölött, illetve alatt működésbe hoz, illetve kikapcsol egy frekvenciaosztót. Az adatgyűjtés bizonytalansága (a két üzemmód közötti illesztés hibája) miatt ezeket az adatsorokat ebben a dolgozatban nem értékeltem ki.

## 4.2. Saját méréseim

### 4.2.1. Az adatok kiértékelése

A 2021. szeptember 20-án végzett méréseim összesen  $6 \cdot 2$  darab adatsort szolgáltatnak. Ezekből 3 az automata, 3 a kézi szabályozórudak méréséből származik, amely mindkét esetben úgy áll össze, hogy 2 mérés az adott rúd szokásos, szuperkritikus állapotban történő rúdejtéses mérése, egy pedig a kritikus állapotban ejtett rúddal tartozik. Mind a hat esetben a 2 mérőlánccal egyszerre mértünk, így lett 12 adatsor. A mérések szerkezetét egyértelműsíti a 10. táblázat.

Rövidítés	AUT1		AUT2		AUT3		KEZ1		KEZ2		KEZ3	
Rúd típusa	automata						kézi					
Reaktorállapot a rúdejtéskor	szuperkritikus				kritikus		szuperkritikus				kritikus	
Mérőlánc	I1	I2	I1	I2	I1	I2	I1	I2	I1	I2	I1	I2

10. táblázat. 2021.09.20-ai saját mérés felépítése

Minden adatot 1 szekundumos binezéssel, a 2. táblázatban szereplő bemeneti paraméterekkel (közös paraméterek) és az egyes adatsorokhoz legjobbnak ítélt átlagolási tartományokkal dolgoztam fel. A kiértékelést két részre osztva elsőként azokat az eseteket tárgyalom, amelyeknél a rúdejtés pillanatában a reaktor szuperkritikus állapotban volt. Ezeket az eredményeket a 11. táblázatban rendszereztem.

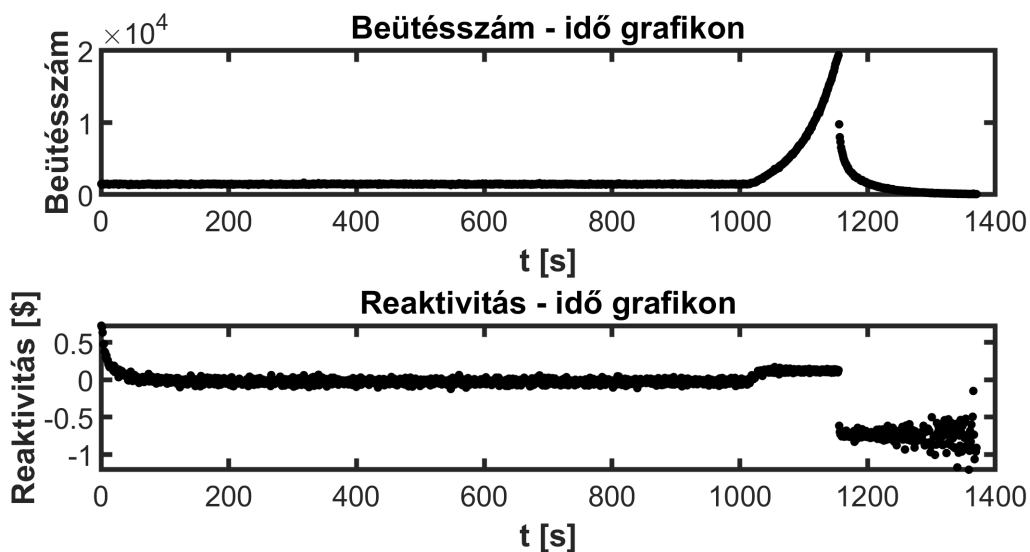
	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Szuperkritikus reaktivitás átlag [\\$]	Szubkritikus reaktivitás átlag [\\$]	Rúdértékesség [\\$]
AUT1	<b>I1</b>	1	0,123	-0,752	<b>0,874</b>
	<b>I2</b>	1	0,121	-0,734	<b>0,855</b>
AUT2	<b>I1</b>	1	0,118	-0,753	<b>0,871</b>
	<b>I2</b>	1	0,119	-0,737	<b>0,857</b>
KEZ1	<b>I1</b>	1	0,212	-1,603	<b>1,815</b>
	<b>I2</b>	1	0,210	-1,689	<b>1,899</b>
KEZ2	<b>I1</b>	1	0,205	-1,585	<b>1,791</b>
	<b>I2</b>	1	0,206	-1,671	<b>1,878</b>

11. táblázat. 2021.09.20-ai, szuperkritikus állapotbeli rúdejtéses mérések kiértékelésének eredményei

A kiértékelés folyamatának szemléltetése érdekében az AUT2 mérés I2 mérőlánccal felvett adatsorának és az ebből számolt reaktivitásnak a közös grafikonját bemutatom az 5. ábrán.

Ezen szépen látszik az egyik legnagyobb kihívás a kiértékelés során: meghatározni azt az intervallumot, ahol a szubkritikus tartományra átlagolni érdemes. Ahogy a grafikonon látszik, kevés beütés esetén ( $t > 1300$  s) már jelentős szórása van a reaktivitásnak, a mérés legvégén ez az effektus pedig már nagyon erős.





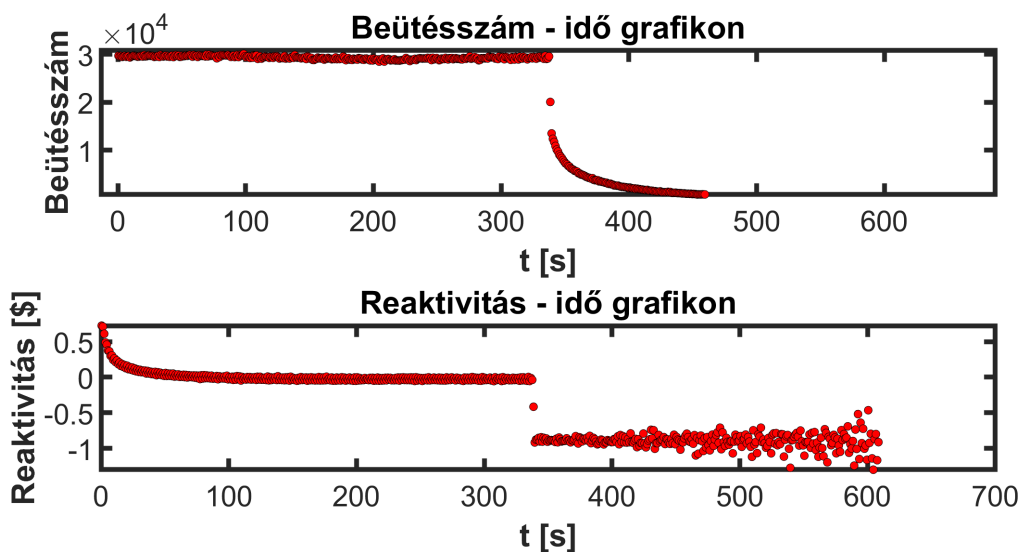
5. ábra. Beütésszám és a számolt reaktivitás az AUT2 I2 mérésnél

A kiértékelés második részében azokat a méréseket vizsgáltam, amelyek során kritikus állapotban történt a rúdejtés. Ezek eredményeit szintén összefoglaltam, ami a 12. táblázatban megtekinthető.

	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Kritikus reaktivitás átlag [\$]	Szubkritikus reaktivitás átlag [\$]	Rúdértékesség [\$]
AUT3	<b>I1</b>	1	-0,026	-0,915	<b>0,888</b>
	<b>I2</b>	1	-0,026	-0,887	<b>0,861</b>
KEZ3	<b>I1</b>	1	-0,026	-1,839	<b>1,813</b>
	<b>I2</b>	1	-0,026	-1,887	<b>1,860</b>

12. táblázat. 2021.09.20-ai, kritikus állapotbeli rúdejtéses mérések kiértékelésének eredményei

A 12. táblázatban látható, hogy a kritikus szakasz reaktivitásának átlaga nem volt az elméletnek megfelelő 0 \$, hiszen itt finom rúdmozgatásokkal törekszünk csak erre, de mindig lesz egy kis eltérés. Az összehasonlítás kedvéért egy ilyen grafikont is bemutatok, ezt láthatjuk a 6. ábrán, amely az AUT3 mérés I2-es adataihoz tartozik. Ezen szépen látszik az előzőekben látott szuperkritikus szakasz hiánya, a rúdejtés pillanata és a szubkritikus szakasz is.



6. ábra. Beütésszám és a számolt reaktivitás az AUT3 I2 mérésnél

#### 4.2.2. Bizonytalanságbecslés

A kiértékelés után minden szeptember 20-án végzett mérésből kapott eredményhez elvégeztem a Monte Carlo alapú hibabecslést az előzőekhez hasonlóan. Ennek eredményét a 13. táblázatban láthatjuk.

	Mérőlánc	$\Delta t$ [s]	Rúdértékesség [\\$]	Várható érték [\\$]	Szórás [\\$]
AUT1	I1	1	0,874	0,877	<b>0,009</b>
	I2	1	0,855	0,857	<b>0,008</b>
AUT2	I1	1	0,871	0,875	<b>0,009</b>
	I2	1	0,857	0,858	<b>0,008</b>
AUT3	I1	1	0,888	0,891	<b>0,010</b>
	I2	1	0,861	0,862	<b>0,009</b>
KEZ1	I1	1	1,815	1,830	<b>0,024</b>
	I2	1	1,899	1,904	<b>0,020</b>
KEZ2	I1	1	1,791	1,806	<b>0,024</b>
	I2	1	1,878	1,884	<b>0,021</b>
KEZ3	I1	1	1,813	1,820	<b>0,021</b>
	I2	1	1,860	1,863	<b>0,021</b>

13. táblázat. 2021.09.20-ai mérési eredmények, azok becsült hibái és az eloszlás várható értékei

### 4.3. Az automata és kézi szabályozórudak reaktivitásértékesége és annak hibája

Az egyes mérések kiértékelése és az eredményekhez tartozó hibák becslése után ezekből együttesen számoltam rúdértékességet az Oktatóreaktor automata illetve kézi szabályozórúdjaira, amit átlagolással végeztem. Az átlagoláshoz minden mérés esetén az I2-es mérőlánc 1 másodperces binézéssel rendelkező adataiból származó eredményeket vettem figyelembe, hiszen az I2-es beütések nagyobbak, ezért az ezekből számolt eredmények szórása kisebb. Továbbá az I2-es adatsorok esetében a perturbálatlan számolás eredményéhez közelebb esik a Monte Carlo mintavételezéssel kapott

rúdértékességek eloszlásának várható értéke. Mindkét rúdhoz ezek szerint összességében hat értékeség és hat bizonytalanság állt a rendelkezésemre a végeredmény megállapításához. A 14. táblázatban megtekinthető az átlagolás egyes elemeinek értéke és ezek szórása.

Automata rúd		Kézi rúd	
Rúdértékesség [\\$]	Szórás [\\$]	Rúdértékesség [\\$]	Szórás [\\$]
0,852	0,008	1,891	0,022
0,854	0,009	1,913	0,021
0,857	0,016	1,921	0,039
0,855	0,008	1,899	0,020
0,857	0,008	1,878	0,021
0,861	0,009	1,860	0,021

14. táblázat. A mérésekből számolt összes, az átlagolásnál figyelembe vett eredmény

#### 4.3.1. Automata rúd

Az Oktatóreaktor automata rúdjának reaktivitásértékessége a számolásaim alapján

$$\boxed{RW_{\text{AUT}} = 0,856 \$ \pm 0,004 \$}. \quad (24)$$

Az ebben szereplő hibát a Gauss-féle hibaterjedés alapján, a kvadratikusan abszolút hibaként számoltam, tehát az átlagolt tagokat  $RW_i$ -vel jelölve ( $i = 1 \dots 6$ )

$$\Delta RW_{\text{AUT}} = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left( \frac{\partial RW_{\text{AUT}}}{\partial RW_i} \Delta RW_i \right)^2}. \quad (25)$$

Az átlagolás

$$RW_{\text{AUT}} = \frac{RW_1 + RW_2 + RW_3 + RW_4 + RW_5 + RW_6}{6} \quad (26)$$

kifejezése miatt

$$\frac{\partial RW_{\text{AUT}}}{\partial RW_i} \Delta RW_i = \frac{1}{6} \Delta RW_i, \quad (27)$$

így a Gauss-féle kvadratikusan abszolút hiba

$$\Delta RW_{\text{AUT}} = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \left( \frac{1}{6} \Delta RW_i \right)^2} = 4,116 \cdot 10^{-3} \$ . \quad (28)$$

#### 4.3.2. Kézi rúd

Az automata rúddal megegyező számolások alapján a reaktor kézi szabályozórúdjának reaktivitásértékessége

$$\boxed{RW_{\text{KEZ}} = 1,894 \$ \pm 0,010 \$}. \quad (29)$$

Az automata és kézi rudak általam számolt reaktivitásértékességei a becült 1 szigma bizonytalanságon belül megegyeznek az Oktatóreaktor végleges biztonsági jelentésében [38] feltüntetett értékekkel, amelyek az automata rúd esetében  $0,852 \$ \pm 0,001 \$$ , a kézi rúd esetében pedig  $1,880 \$ \pm 0,010 \$$ , mindkét esetben alulbecsült hibákkal. Az eredményeimet az LND detektorral végzett mérésről szóló jelentésben [32] szereplő rúdértékességekkel összevetve szintén hibahatáron belüli egyezést tapasztaltam.

## 5. fejezet - Összefoglalás

TDK munkám során rúdejtéses méréseket végeztem el és értékeltem ki egy saját fejlesztésű inverz kinetika kóddal. A kiértékelt mérések között szerepeltek régebbi, a BME Oktatóreaktor 2016-os Időszakos Biztonsági Felülvizsgálata előtt Horváth András által végzett mérések. Ezen kívül két további, 2021. február 23-án és február 25-én Ványi András Szabolcs által vezetett rúdejtéses mérés adatait is feldolgoztam. 2021. szeptember 20-án saját rúdejtéses méréseket is végeztem az Oktatóreaktorban a kézi és automata szabályozórudak reaktivitásértékességének meghatározása céljából. A mérés során értékes tapasztalatokat szereztem.

Az inverz kinetikai megoldó programot MATLAB környezetben írtam. Az algoritmus implementálásához részletesen tanulmányoztam az inverz kinetika módszerét, a szükséges numerikus módszereket, a holtidót, valamint a későneutron paramétereket. Vizsgálódásom során felkutattam a Nukleáris Technikai Intézetben eddig elvégzett rúdejtéses méréseket és ezek eredményeit, illetve az erre a célra kifejlesztett kódokat. Az inverz kinetikai megoldó program mellett több segédprogramot is készítettem különböző feladatok ellátására, melyek közül kiemelkedő fontosságú a Monte Carlo elvű bizonytalanságbecslést végző segédkód. Ez a számolt rúdejtésességhez úgy rendel bizonytalanságot, hogy az egyes bemeneti paramétereket a hozzájuk tartozó szórással jellemezhető, normális vagy Poisson-eloszlásból mintavételezi, majd minden futási ciklusban a bemeneti paraméterek így kapott aktuális rendszerét felhasználva meghatároz egy értékességet. Ezt 5000-szer ismétli, majd a rúdejtésességek eloszlását Gauss-eloszlással közelítve annak félértékességségéből becsül 1 szigma szórást.

A mérések kiértékelése során kapott eredmények egymással konzisztensek lettek, az azonos körülmények között, azonos módszerrel, különböző mérési napokon végzett mérések hibahatáron belül megegyező eredményeket adtak. Legvégül az Oktatóreaktor automata, illetve kézi szabályozórúdjai reaktivitásértékességére a mérések összességének figyelembe vételével rendre  $0,856 \pm 0,004$  és  $1,894 \pm 0,010$  eredményt kaptam. Ezeket összehasonlítva az Oktatóreaktor végleges biztonsági jelentésében, valamint a régebbi mérések leiratában szereplő értékekkel, jó egyezéshez jutottam.

## 6. fejezet - Kitekintés, további célok és lehetőségek

A dolgozatban leírt munkának a későbbi esetleges tanulmányok szempontjából az egyik legnagyobb eredménye a létrehozott inverz kinetika kód, amely alkalmas érzékenységvizsgálatra, hibabecslésre is és teszi mindezt modern MATLAB környezetben, látványos, letisztult és jól értelmezhető grafikonokat készítve, az eredményeket kiírva, illetve fájlokba mentve. A továbbiakban természetesen ezt magasabb szintűre lehet fejleszteni, ügyesebb megoldásokkal gyorsítani, optimalizálni, egyéb programnyelveken implementálni, hordozhatóvá tenni, további funkciókat hozzátenni stb.

A megvalósított számításokat alapul véve hasonlóan egyéb rudak, például a két biztonságvédelmi rúd, kazetták vagy minták reaktivitásértékességének mérése, vagy akár reaktiméter készítése lehetséges egy esetleges későbbi projekt keretében.

Implementálható továbbá a forrásos inverz kinetika módszer, amely alkalmas a zónában lévő neutronforrás kezelésére. Vizsgálható a módszer érvényeségi köre, valamint a dinamikus és sztatikus reaktivitások közötti különbség.

## 7. fejezet - Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Ványi András Szabolcsnak a sok konzultációt, szakmai megbeszélést, építő kritikát és útmutatást, amely lehetővé tette a munkám és a dolgozatom elkészülését. András szakmai felkészültsége és kiterjedt háttérmunkája nélkül mindez nem jöhetett volna létre. Köszönet illeti továbbá a BME Oktatóreaktorának személyzetét a mérések sikeres és szakszerű megvalósításáért, Klujber Gergelyt ugyancsak a mérések lebonyolításában végzett jelentős tevékenységéért valamint Holl Viktort az inverz kinetika Paksi Atomerőműben való alkalmazásáról nyújtott tájékoztatásáért. Hálával tartozom Horváth Andrásnak, aki rendelkezésünkre bocsátotta a régebbi kódrészletet, az általa végzett mérések adatait és számos technikai részletet. Külön köszönöm szüleim áldozatos munkáját és támogatását, valamint barátaim és hallgatótársaim, Fehérvári János Gergő, Papp Levente Balázs és Koltai Kristóf töretlen támogatását és megértését.

# Hivatkozások

- [1] Wikipedia: Chicago pile 1, [https://en.wikipedia.org/wiki/Chicago\\_Pile-1Significance\\_and\\_commemoration](https://en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1Significance_and_commemoration), [2021.10.16.]
- [2] Atomic Heritage Foundation: The Manhattan Project, <https://www.atomicheritage.org/history/manhattan-project>, [2021.10.16.]
- [3] B. Cameron Reed: Manhattan Project, Editor: Ehud Greenspan, Encyclopedia of Nuclear Energy, Elsevier, 2021, ISBN 9780128197325, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128197257000428>, [2021.10.16.]
- [4] Keith V. Gilbert: History of the Dayton Project, Monsanto Research Corporation Miamisburg, Ohio, June 1969.
- [5] Wikipedia: Dayton Project, [https://en.wikipedia.org/wiki/Dayton\\_Project](https://en.wikipedia.org/wiki/Dayton_Project), [2021.10.16.]
- [6] International Atomic energy Agency Topics, <https://www.iaea.org/topics>, [2021.10.09.]
- [7] I.S. Hwang, S.H. Jeong, B.G. Park, W.S. Yang, K.Y. Suh, C.H. Kim, The concept of proliferation-resistant, environment-friendly, accident-tolerant, continual and economical reactor (PEACER), Progress in Nuclear Energy, Volume 37, Issues 1–4, 2000, Pages 217-222, ISSN 0149-1970, [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(00\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00049-4), [2021.10.09.]
- [8] Szatmáry Zoltán: Bevezetés a reaktorfizikába, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Budapest, 2000, ISBN: 9630577348
- [9] Dr. Szatmáry Zoltán: Inverz kinetika, BME-NTI-319/2006, Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet, Budapest, 2006. február.
- [10] James J Duderstadt, Louis J Hamilton: Nuclear reactor analysis, New York, Wiley 1976
- [11] Holl Viktor (MVM Paksi Atomerőmű Zrt., reaktorfizikai osztály) személyes közlése alapján.
- [12] Bo Wan, Qi Zhou, Liang Chen, Fei Ma, Honglin Ge, Yanbin Zhang, Hongbin Zhang, Yongqin Ju, Yanyan Li, Lu Zhang, Yang Liu, Shuhong Liang, Wei Zhang, Jin Jin, Peng Luo, Hushan Xu, Qingfu Zhu, Yongqian Shi, Xueying Zhang, Reactivity measurement at VENUS-II during control rods drop based on inverse kinetics method, Nuclear Engineering and Design, Volume 338, 2018, Pages 284-289, ISSN 0029-5493, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.08.019>, [2021.10.25.]
- [13] Paolo Picca, Roberto Furfaro, Neutron inverse kinetics via Gaussian Processes, Annals of Nuclear Energy, Volume 47, 2012, Pages 146-154, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.03.023>, [2021.10.25.]
- [14] Shumiao Wang, Haojun Zhou, Zhongxiong Bai, Xiaoqiang Fan, Yanpeng Yin, Investigations of sample reactivity worth measurement in a fast neutron reactor with the inverse kinetics method, Annals of Nuclear Energy, Volume 117, 2018, Pages 109-113, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.020>, [2021.10.25.]
- [15] Daniel Suescún-Díaz, Gilberto Espinosa-Paredes, Freddy Humberto Escobar, Inverse method to obtain reactivity in nuclear reactors with P1 point reactor kinetics model using matrix formulation, Nuclear Engineering and Technology, Volume 53, Issue 2, 2021, Pages 414-422, ISSN 1738-5733, <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.003>, [2021.10.25.]
- [16] Wemerson de Carvalho Gonçalves, Aquilino Senra Martinez, Fernando Carvalho da Silva, Inverse kinetics for subcritical systems with external neutron source, Annals of Nuclear Energy, Volume 108, 2017, Pages 343-350, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.004>, [2021.10.25.]

- [17] Adam M. Gadomski, Jacek Boużyk, Monika Sujczyńska, Determination of small reactivity in real time by the inverse kinetics method, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 6, Issue 3, 1979, Pages 175-183, ISSN 0306-4549, [https://doi.org/10.1016/0306-4549\(79\)90083-5](https://doi.org/10.1016/0306-4549(79)90083-5), [2021.10.25.]
- [18] Glenn F. Knoll: *Radiation Detection and Measurement* 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, 2000
- [19] Faragó István (ELTE TTK), Horváth Róbert (BME TTK): *Numerikus Módszerek*, Typotex, 2011, [http://tankonyvtar.ttk.bme.hu/html/horvath\\_video/30.pdf](http://tankonyvtar.ttk.bme.hu/html/horvath_video/30.pdf), [2021.10.16.]
- [20] Horváth Róbert: *Numerikus Analízis (BSc), Numerikus módszerek fizikusoknak (MSc) kurzusokhoz készült előadás diák*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Természettudományi Kar, Matematika Intézet, Analízis Tanszék, 2017.ősz
- [21] Rais, Adolfo, Performance assessment of a 3-D steady-state and spatial kinetics model for the CROCUS reactor. No. THESIS. EPFL, 2018., <https://infoscience.epfl.ch/record/255084?ln=en>, [2021.10.27.]
- [22] James Grayson: *Control Rods in Nuclear Reactors*, Stanford University, February 17, 2011, <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/grayson1/>, [2021.10.16.]
- [23] Per Magnusson: Investigation of control rod worth and nuclear end of life of BWR control rods, pages 1.-2., Chalmers University of Technology, Department of Nuclear Engineering, January, 2008, [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/069/39069865.pdf?r=1r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/069/39069865.pdf?r=1r=1), [2021.10.16.]
- [24] BME Nukleáris Technikai Intézet, 50 éves az Oktatóreaktor, <http://www.reak.bme.hu/50ev>, [2021.10.25.]
- [25] Balazs Molnar, Gabor Tolnai, David Legrady, A GPU-based direct Monte Carlo simulation of time dependence in nuclear reactors, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 132, 2019, Pages 46-63, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.03.024>, [2021.10.25.]
- [26] David Legrady, Mate Halasz, Jozsef Kophazi, Balazs Molnar, Gabor Tolnai, Population-based variance reduction for dynamic Monte Carlo, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 149, 2020, 107752, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107752>, [2021.10.25.]
- [27] Babcsány Boglárka, Hajas Tamás, Mészáros Péter, Tranziens reaktorfizikai folyamatok végeelem-módszeren alapuló diffúziós modellezése, *Nukleon*, 2020. szeptember, XIII.évf.(2020) 233, [https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/13\\_2\\_233\\_Babcsany.pdf](https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/13_2_233_Babcsany.pdf), [2021.10.25.]
- [28] A.Sz. Ványi, B. Babcsány, Z.I. Böröczki, A. Horváth, M. Hursin, M. Szieberth, Sz. Czifrus, Steady-state neutronic measurements and comprehensive numerical analysis for the BME training reactor, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 155, 2021, 108144, ISSN 0306-4549, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108144>, [2021.10.27.]
- [29] BME Nukleáris Technikai Intézet, Az Oktatóreaktor története, <http://www.reak.bme.hu/oktatoreaktor/tortenet.html>, [2021.10.23.]
- [30] BME Nukleáris Technikai Intézet, Az Oktatóreaktor felépítése és műszaki adatai, <http://www.reak.bme.hu/oktatoreaktor/felepites.html>, [2021.10.23.]
- [31] BME Nukleáris Technikai Intézet, Az Oktatóreaktor kísérleti berendezései, <http://www.reak.bme.hu/oktatoreaktor/berendezesek.html>, [2021.10.23.]
- [32] Horváth András: Reaktorfizikai mérések az Oktatóreaktoron, BME-NTI-708/2015, 2015, 10.,15.-16.,22.-25. oldalak

- [33] Nuclear Radiation Detectors / Boron lined neutron proportional counter, LND INC. Oceanside, New York, USA, <https://www.lndinc.com/products/neutron-detectors/23210/>, [2021.10.16.]
- [34] Horváth András (BME Nukleáris Technikai Intézet) személyes közlése alapján.
- [35] Photonis: Neutron detectors, <https://www.photonis.com/products/fission-chambers-out-core-use>, [2021.10.22.]
- [36] Leppänen, Jaakko Aufero, Manuele Fridman, Emil Rachamin, Reuven van der Marck, Steven. (2014). Calculation of effective point kinetics parameters in the Serpent 2 Monte Carlo code. *Annals of Nuclear Energy*. 65. 272. 10.1016/j.anucene.2013.10.032. , [https://www.researchgate.net/publication/259189350\\_Calculation\\_of\\_effective\\_point\\_kinetics\\_parameters\\_in\\_the\\_Serpent\\_2\\_Monte\\_Carlo\\_code](https://www.researchgate.net/publication/259189350_Calculation_of_effective_point_kinetics_parameters_in_the_Serpent_2_Monte_Carlo_code), [2021.10.27.]
- [37] Gregory D. Spriggs, Joann M. Campbell, Vladimir M. Piksaikin, An 8-group delayed neutron model based on a consistent set of half-lives, *Progress in Nuclear Energy*, Volume 41, Issues 1–4, 2002, Pages 223-251, ISSN 0149-1970, [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(02\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(02)00013-6)., [2021.10.27.]
- [38] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet, BME Oktatóreaktor Végleges Biztonsági Jelentés, 4. kötet, A Reaktor Részletes Leírása, Verzió: 1.3, Azonosító: NTI-VBJ-04-1.3 / 2018