

A GUARDYAN GPU alapú reaktorkinetikai Monte Carlo-kód

Molnár Balázs, Tolnai Gábor, Tóth Boglárka, Légrády Dávid, Horváth András

BME Nukleáris Technikai Intézet
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 9.

A BME Nukleáris Technika Intézeténél egy 3D reaktorkinetikai Monte Carlo-kódot fejlesztünk, ami képes neutrontranszport-folyamatok időfüggését explicit módon figyelembe venni és így gyors reaktortranzieneket szimulálni. A GUARDYAN (GPU Assisted Reactor Dynamic Analysis) nevű kód az időfüggő Monte Carlo-szimulációkhoz szükséges hatalmas számítási kapacitást modern GPU (Graphics Processing Unit) architektúrákon történő implementációval fedezi. Emiatt az alkalmazott módszerek, algoritmusok jelentősen eltérnek a konvencionális CPU-kódokban használtaktól. A jelenleg is fejlesztés alatt álló kód képes szimulálni a BME Oktatóreaktorának tranziensviselkedését. A teljesítménymenetet a mérési eredményekkel összevetve szép egyezést tapasztaltunk. Ezen túl a GUARDYAN a VVER-440 és a VVER-1200 zónák modellezésére is használható. Ilyen bonyolultságú esetekben a transzportszámítások futásidőigénye 50 óra/1 valós másodperc körül alakul a jelenlegi hardvereken.

Bevezetés

A GUARDYAN (GPU Assisted Reactor Dynamic Analysis) egy grafikus kártya (GPU - Graphics Processing Unit) alapú 3D Monte Carlo-kód (MC-kód), ami képes közvetlenül szimulálni multiplikatív rendszerek időfejlődését. A GPU-k tudományos számításokra használható potenciálja jelentősen nőtt az elmúlt évtizedben. Ma már egyetlen GPU TFLOP méretű számítási kapacitással rendelkezik, és az előnyük a CPU-kal szemben egyre inkább kifejeződik. Időfüggő neutrontranszport számításokra MC-kóddal korábban nem volt lehetőség a hatalmas számítási igény miatt, de ma már ezek végrehajtására rendelkezésre áll a párhuzamos feldolgozást alkalmazó hardveres háttér, számítógépklaszterek illetve GPU-fürtök formájában. A GUARDYAN ez utóbbi kedvező tulajdonságait használja ki, és hatékony eszközt képvisel tranziensek szimulációjára. Ennek ára azonban az, hogy a hagyományos technikáktól egészen eltérő módszereket kellett alkalmaznunk a GUARDYAN létrehozása során, ami a hagyományosan használt CPU és a GPU közötti különbségekből ered. Ez az oka annak is, hogy - bár a mai gyakorlatban legtöbbször alkalmazott általános MC-kódok fejlesztői is felismerték már az időfüggés explicit figyelembevételének lehetőségét, - ezeket a kódokat nehéz, illetve célszerűtlen lenne átírni ahhoz, hogy jobban kihasználják a leghatékonyabb hardverek adottságait. Emiatt a GPU helyett a számítási igényt egyre több és több CPU elem párhuzamos felhasználásával kívánják kielégíteni. A TRIPOLI-4 [1], OpenMC [2] és Serpent [3] MC-kódokhoz kinetikus/dinamikus modulokat csak az elmúlt néhány évben kezdtek fejleszteni, bár a publikált eredmények alapján a próbálkozások még mindig sok egyszerűsítéssel élnek a későneutronok kezelését és/vagy a rendszer bonyolultságát tekintve. Az nyílt forráskódú OpenMC szoftver kinetikus kiegészítő modulja [4], illetve a Serpent 2 direkt időfüggő számításai [5] [6] is erős közelítésekkel élnek a késő neutronok szempontjából, vagy el is hanyagolják azok hatását. Míg ez bizonyos esetekben jó közelítés lehet, általánosságban komoly

hiányosság.

A G4-STORK MC kód [7] a Geant4 neutrontranszport lehetőségeire építve szintén tranziensviselkedést kíván szimulálni, a késő neutronok kezelése azonban még megvalósításra vár. Más próbálkozások a késő neutronok kulcsszerepét helyesen felismerik, és általában [8]-ban bemutatottakra építve a prekursorok mintavételezésével tudják kezelni azokat, de csak 2D geometriában [9] vagy a transzport kódban, diffúziós közelítéssel élve [10]. Az általunk fejlesztett GUARDYAN egy közelítésektől mentes, a teljes zóna időfejlődését explicit módon szimulálni képes, tisztán MC-kód, amelyhez hasonló, a szakmában releváns példa igen kevés akad. A TRIPOLI-4 kinetikus modulja [11], - ami bár a SPERT-III zónára végzett tranziens számítások futásidő igényére nem közöl információt, - egy egyszerűbb benchmarkrendszer esetében a futásidő 300 óra/valós másodperc volt. Ehhez képest a GUARDYAN egy nagyságrenddel gyorsabb, bár hozzá kell tenni, hogy alkalmas tranziens benchmark még nem létezik vagy nehezen elérhető.

A GUARDYAN számos egyedülálló számítástechnikai megoldással rendelkezik, amelyekre két okból volt szükség: a GPU hardver és az időfüggés. Az előbbi például megkívánja, hogy a MC fejlesztőknél már rutinszerűen alkalmazott splitting/Russian roulette (trajektória felhasítás és orosz rulett) technikákat elveszük, és más algoritmusok után nézzünk. A GUARDYAN-ben fésülést [12] és kényszerített hasadást [13] alkalmazunk a statisztikus szórás csökkentésére, illetve a kritikustól távol eső rendszereknél tipikusan felmerülő populáció-kontroll problémákra. Az explicit időfüggés a hatáskeresztmetszetek megváltozását okozó geometriai változások (rúdmozgások) és a termohidraulikai visszacsatolások figyelembevételét követeli meg. A GUARDYAN ezért az MCNP-kódokban is alkalmazott generációról-generációra követés helyett időlépéseket használ. Ezek megvalósítása GPU környezetben egyáltalán nem triviális, további betekintést ezekbe a megoldásokba

[14]-ből nyerhetünk, ebben a cikkben csak a GUARDYAN-ben megvalósított későneutron-kezelést, valamint a BME Oktatóreaktorán végzett tranziensmérést, illetve annak szimulációját mutatjuk be.

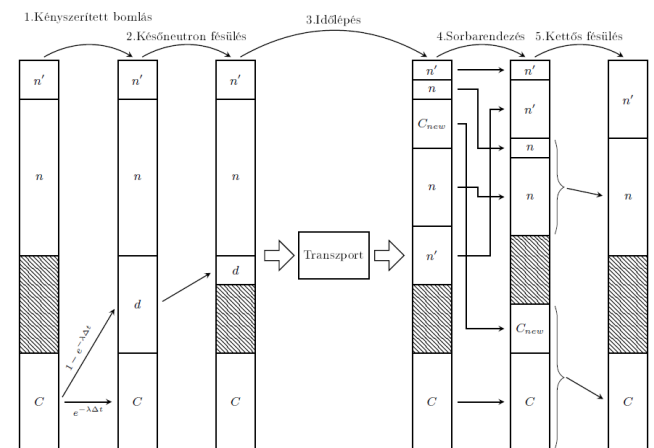
Későneutron-kezelés a GUARDYAN-ben

A prompt neutronok és a késő neutronok élettartama közötti különbség akár több nagyságrend is lehet, mivel a prompt élettartam termikus rendszerekben tipikusan néhány száz 10 μ s, míg a késő neutronok várható élettartama 0,1 s és 100 s közé esik. Emiatt a késő neutronok analóg MC szimulációja nem jöhet számításba, mert a gyakorlatban kétféle probléma jelentkezne: egyrészt a prompt neutronok hasadási láncai eltűnnének a szimulációból a késő neutronok alul-mintavételezése miatt, valamint maguk a késő neutronok a keletkezésüket kiváltó hasadási eseménytől számítva csak nagyon sok prompt generáció után lépnének kölcsönhatásba az anyaggal (egészen addig feleslegesen tárolnánk őket). A szakirodalom erre a problémára a prekursorok mintavételezését ajánlja. Nem triviális kérdés, hogy hogyan osszuk fel a MC mintákat a prekursorok és a neutronok között. Az analóg mintavételezés azt diktálná, hogy a neutronminták mellett nagyságrendekkel több prekuzorminta legyen. Ennek oka, hogy ha egyensúlyi állapotot tételezünk fel a neutronok és a prekursor atommagok koncentrációja között, fennáll a $C_i = \beta_i / (\lambda_i * \Lambda) * n$ összefüggés, ahol C_i az i . prekuzorcsoport koncentrációja, β_i és λ_i rendre a későneutron-hányad és a bomlási állandó, Λ az átlagos generációs idő, n pedig a neutronok sűrűsége. Mivel termikus rendszerekre jellemzően Λ a 10-100 μ s-os tartományban van, az egy neutronra jutó prekuzorminták számának 1000-10000 között kell lennie, ha a valóságot analóg módon kívánjuk modellezni. A reaktor teljesítményének becslése szempontjából a prekursorok fontossága nyilvánvalóan el lenne így túlozva, ezért a GUARDYAN-ben nem analóg módon kezeljük a prekursorok mintavételezését. Egy prekuzorminta a szimulációban valójában a prekursor atomok egy populációját képviseli a prekursor statisztikus súlyán keresztül. Az optimális mintaelosztás a prekursorok és a neutronok között változik az időben, ahogy a rendszer sincs egyensúlyban. Szubkritikus rendszerekben például a korábban létrehozott prekursorok fontosabb szerepet játszanak, hiszen ha a prekuzorokat alulmintavételeznék, a promptneutron-minták hamar eltűnnének a rendszerből. Szuperkritikus esetben ez nem okozna komoly gondot, mivel ekkor a prompt neutron láncok is stabil teljesítménymenetet produkálnak. Ez a gondolatmenet arra mutat rá, hogy a minták optimális felosztásához a kódnak előre kellene tudnia a tranziens menetét, és időfüggő adjungált függvényre lenne szükség. Ennek kiküszöbölésére GUARDYAN-ben egy robusztus későneutron-kezelő modul alkalmazunk, ami nem-analóg technikákkal mintavételezi a késő neutronokat anélkül, hogy időfüggő adjungáltra lenne szüksége.

A GUARDYAN a neutronokat és a prekuzorokat a GPU globális memóriájában tárolja, ez alkotja a részecske-tömböt. A tömb méretének megváltoztatása nem megengedett, mivel a GPU rögzített hosszú adatfolyamokon a leghatékonyabb. Hogy mégis megengedjünk dinamikus változásokat, a tömb egy része kezdetben üres, ami egyfajta pufferként funkcionál. A prekuzorokból

mintavételezett késő neutronok először ezekre az üres helyekre kerülnek, majd összefésüljük őket a prompt neutronok súlyának átlagára. Emiatt szubkritikus esetben, miközben a prompt neutronok súlya csökken, a későneutron-mintákból egyre több lesz meggátolva, a populáció kihalását. Szuperkritikus állapotban a prompt neutronok átlagsúlya növekszik, így a késő neutronok egyre kevésbé lesznek reprezentálva. Ez azonban nem okoz gondot a teljesítménybecslés szempontjából, hiszen ekkor a prompt láncok fenntartják a stabilitást. A prekuzorminták száma eközben végig pontosan ugyanannyi marad a kényszerített bomlás technikájának köszönhetően.

A könnyebb megértés érdekében tekintsük meg az 1. ábrát. A szimuláció kezdődhet azzal, hogy a felhasználó megadja a részecskék kezdeti eloszlását, vagy kritikus állapothoz tartozó kezdőfeltételt is generálhatunk. A GPU részecsketömböt két egyforma részre osztjuk: az első felében a prompt neutronokat tároljuk, míg a második fele további két egyenlő részre van bontva, amelyekben a prekuzorok és a belőlük mintavételezett késő neutronok foglalnak helyet. Az utóbbi kezdetben üres. Ez a kiindulóhelyzet látható a 1. ábra első oszlopaként. Minden időlépés azzal fejeződik be, hogy a tömböt erre a struktúrára rendezzük vissza. Az ábrán megkülönböztetjük a következő időlépésben reakcióba lépő neutronokat (n) azoktól, amelyek kölcsönhatás nélkül átrepülnek a szakaszt (n'). Ez még a szabad úthossz sorsolásnál eldől. A prekuzorokat C -vel jelöljük.



1. ábra: A részecskemintákon egy időlépésben végrehajtott műveletek összefoglalása

A részecsketömbön egy időlépésben a következő műveleteket hajtuk végre:

- Minden prekuzor-minta kényszerített bomláson [15] megy keresztül: a késő neutronok feltöltik az üres helyeket $1 - e^{-\lambda \Delta t}$ súllyal, a prekuzor minták pedig megmaradnak, de csak $e^{-\lambda \Delta t}$ súllyal. A kényszerített bomlás mindig elegendő mennyiségű neutronmintát szolgáltat a következő időlépésre, aminek az alkalmazása a tapasztalatok szerint elengedhetetlen.
- A késő neutronokat a prompt neutronok súlyának átlagára fésüljük a [12]-ben bemutatott egyszerű fésüléssel.
- Az n -nel és d -vel jelölt neutronokon végrehajtuk egy időlépés lejátszását. Az időlépés után megváltozik a vesszőtlen és vesszővel jelölt populációk definíciója, ugyanis más neutronok fognak részt venni a következő

időlépésben, mint eddig (az ábrán is ezt követhetjük). Az egy időlépés alatt lejátszódó hasadási események termelhetnek prekursorokat is, amit egy külön reakcióként veszünk figyelembe: egy neutron β valószínűséggel prekuzormintává válhat minden hasadáskor. Ha a mintavételezett bomlási ideje kívül esik az aktuális időszakon, akkor az időlépés elején még neutronként jegyzett mintát a szakasz végére prekuzor mintaként könyveljük. Így mind az n , mind a d populációból kerülhet ki a szakasz végén prekuzor-minta, ezeket jelöljük C_{new} -val.

- A következő lépésben sorba rendezzük a mintákat úgy, hogy először a neutronok, utána üres hely, majd a prekuzorok legyenek feljegyezve.
- Utolsó lépésben külön fésüljük a következő időlépésben résztvevő neutronokat és prekuzorokat is, ezáltal a kiinduló helyzettel analóg struktúrát kapunk.

Tranziensmérés a BME Oktatóreaktorában, és annak szimulációja GUARDYAN-nel

Annak ellenére, hogy számos kritikusság-számítási benchmark elérhető, nem találtunk olyan, tranziens tartalmozó esetet, mellyel a GUARDYAN képességei megfelelő módon ellenőrizhetők lettek volna. Ezért a BME Oktatóreaktorában terveztünk kísérletet, és megpróbáltunk egy rövid tranziens során létrejövő teljesítményfejlődést a GUARDYAN kóddal reprodukálni.

Időfüggő MC kódok validációja

A szakirodalomban ismert tranziens benchmarkok szinte kizárólag vagy olyan neutrontranszport-kódok validációjára alkalmasak, amelyek termohidraulikát is tartalmaznak, vagy nagyon egyszerűsített rendszert tételeznek fel. Más, tranziens tartalmozó benchmarkok többcsoport-hatáskeresztmetszeteket használó determinisztikus kódokhoz készültek.

Általánosságban elmondható, hogy szükség lenne olyan, komplex geometriájú, időfüggő benchmark modellel, amely nem tartalmaz termohidraulikai visszacsatolásokat. Az időfüggő neutronikai modul tesztelése céljából célszerű a visszacsatolási hatásokat szétválasztani a benchmarkban, hiszen közel sem egyértelmű a késő neutronok kezelése, az explicit időfüggés, a populáció kontroll stb. implementálása sem. Ennek köszönhetően a kinetikus MC-számításokra vonatkozó korábbi tanulmányok kénytelenek voltak túlságosan egyszerűsített, hipotetikus modelleket alkalmazni az időfüggő neutronikai modul ellenőrzésére. Amellett, hogy különösen fontos lenne egy kinetikus benchmark az olyan új kódokhoz, mint a GUARDYAN, előnyös lenne az egyébként alaposan tesztelt időfüggő modullal bővített általános célú kódok verifikációs munkájához is.

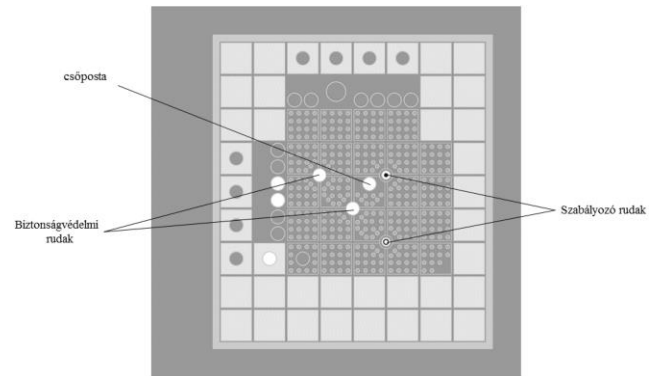
A GUARDYAN mérési adatokkal való összehasonlítása kettős célt szolgált. Először is a termohidraulikai számítások csatolása előtt ellenőrizni szeretnénk volna azt, hogy az általunk alkalmazott megoldás időfüggő esetben milyen eltéréseket mutat. Másodszor pedig demonstrálni szeretnénk volna a GUARDYAN időfüggő képességeit, egyben képet kapni a számítási teljesítményről valós zónában lezajló tranziens esetére. Ezen túl szeretnénk volna

alapot adni egy későbbi, időfüggő MC benchmark tanulmányhoz az időfüggő MC-kódok objektív összehasonlítása céljából.

Kísérleti elrendezés

A kísérletet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Nukleáris Technika Intézet (NTI) Oktatóreaktorában végeztük el. A létesítmény könnyű vízzel moderált és hűtött reaktor több olyan berendezéssel, amelyek kutatási és oktatási célokat szolgálnak. Ilyenek például a függőleges és vízszintes besugárzási csatornák, valamint a csőposta rendszer. A kísérleti elrendezés megtekinthető a 2. ábrán.

A tranziens előidézésére egy kadmiumgyűrűt juttattunk a zónába a csőpostán keresztül, amelyet az ábrán megjelöltünk. A bejuttatott gyűrű 40 mm magas volt 9 mm átmérővel és 0,5 mm falvastagsággal. A gyűrű lokálisan megnövelte az elnyelést különösen a termikus tartományban. A teljes reaktivitás-bevitel körülbelül -20 cent volt.



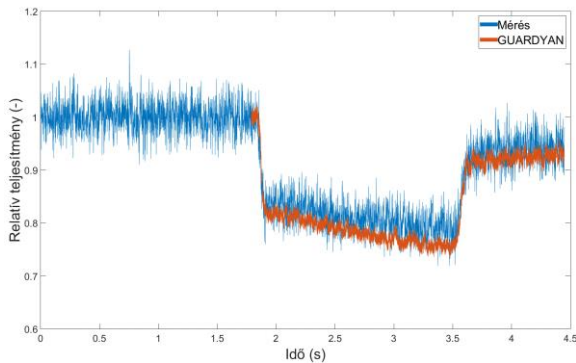
2. ábra: A BME Oktatóreaktorának GUARDYAN modellje

A minta belövése előtt a reaktor néhány percig kritikus állapotban üzemelt, így a tranziens egyensúlyi állapotból indulhatott. Annak érdekében, hogy elhanyagolhassuk a termohidraulikai visszacsatolásokat, a reaktort kis teljesítményen üzemeltettük, a kezdeti állapotban 500 W-on. Ez a teljesítményszint egy kompromisszum eredménye az ezredmásodperc alatt regisztrálható beütésszámok kielégítően jó statisztikája és a visszacsatolások elhanyagolásából származó hiba minimalizálása között. A tranziens teszt célja az volt, hogy bemutassuk, a GUARDYAN képes követni olyan gyors változásokat, mint a prompt-ugrás, amely jellemzően néhány promptneutron-élettartam alatt megy végbe (emiat volt szükségünk ezredmásodperces időfelbontásra). A prompt-ugrás után a tranziens néhány másodpercig megfigyeltük, majd a kadmium gyűrűt kihoztuk a zónából, ezzel a reaktor visszakerült kritikus állapotba. A reaktor teljesítményével arányos detektorjel regisztrálására az I2 mérőláncot használtuk, amelynek eleme a zónán kívüli víztartályban elhelyezett CFUL08 hasadási kamra. A mérőlánc által szolgáltatott TTL (tranzisztor-tranzisztor logika) jelhez a reaktortartály tetején férhettünk hozzá. A digitális jelet egy FPGA egység bemenetére vezettük, ez biztosította a nagy gyakorisággal érkező beütésszámok regisztrálását. Az FPGA egység a négyesjegyű kódok közötti időkést mérte 25 ns felbontással (40 MHz), ezáltal lényegében időbélyegekkel látva el a beütéseket. Az időbélyegzett adatokból ezredmásodperces intervallumokra összegzett beütésszámokat készítettünk. Így jellemzően 1000/ezred-

másodperc beütéseket kaptunk, amely érték 3%-os relatív bizonytalanságot tartalmaz. A holtidő-korrigált mért adatok a 3. ábrán láthatók.

A Monte Carlo-modell és tranziens elemzés GUARDYAN-nel

A [16]-ban leírt MCNP benchmark alapján készítettük a GUARDYAN számára az Oktatóreaktor geometriai modelljét. A kadmium gyűrű bejuttatására egyenes, 7,5 m/s sebességet feltételeztünk. A kijuttatás során egyenes gyorsulást feltételeztünk nyugalmi állapotból indulva 30,6 m/s² értékkel a vákuumpumpa emelő ereje alapján. Ez azért volt szükséges, mert a pillanatszerű be- és kijuttatás során kapott eredményeink jelentős eltérést mutattak a mért adatoktól. A szimulációban ²²²Rn (~4 millió) részecskét használtunk 10⁻⁵ s időlépésekben haladva, értékesség alapú fésülést használva. A teljes futási idő megközelítőleg 150 óra volt egy kereskedelmi forgalomban is kapható videokártyán (Nvidia Geforce GTX 1080). Összehasonlításképpen, egy nemrégiben készült tanulmány szerint [11] 10 másodperces folyamatot a TRIPOLI-4 MC kód 3000 CPU óra futási idővel szimulált. Ez azt jelenti, hogy egy nagyságrendű különbség van a GUARDYAN javára, azonban az összehasonlítás jogossága vitatható, hiszen a szimulációk nem ugyanazon a problémán futottak.

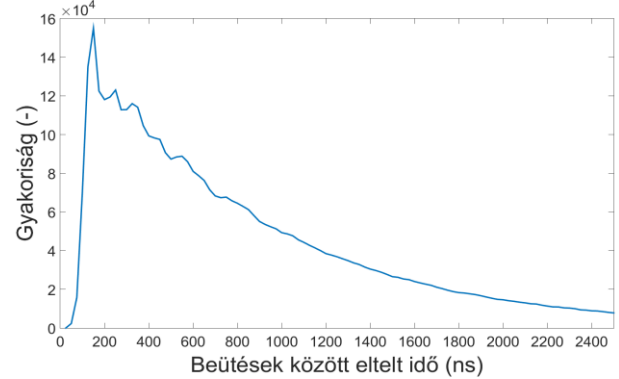


3. ábra: A tranziens kísérlet mérési eredményei (kék) és a GUARDYAN szimuláció teljesítménymenete (piros)

A 3. ábrán láthatjuk, hogy a GUARDYAN képes szimulálni egy kis kadmium gyűrű bejuttatása által okozott tranziens, amely nehéz feladat determinisztikus kódok számára is. A GUARDYAN-nel néhány századmásodperc alatt végbemenő változásokat is képesek vagyunk lekövetni, így a kadmium gyűrű be- és a kijuttatása során lezajlott teljesítményváltozást is szépen sikerült reprodukálni. A kísérleti és szimulált adatok azonban nem egyeznek tökéletesen. A hiba okai lehetnek az MC modell és a valós reaktorzóna közötti eltérések, de akár a kadmiumgyűrű mozgására alkalmazott modell közelítései is. Egy másik lehetséges hibaforrás a detektor holtidejének bizonytalansága. A holtidő-korrekciót a bénítható holtidő modell [17] alapján végeztük, amellyel 150 ns holtidőt becsültünk.

Ezt a halott időszakot elsősorban a detektor okozza, mivel a láncban lévő más jelfeldolgozó egységek gyorsabbak (pl. az időbélyegek generálásának elméleti határa 40 MHz). Az I2 mérőlánc részeként a detektor a reaktor rögzített alkotórésze és nincs mód arra, hogy olyan referenciaforrásos méréseket állítsunk össze, amelyekkel a holtidő meghatározható lenne. Így a holtidőt a beütések között

eltelt idő eloszlásának (time interval distribution, TID) elemzésével határoztuk meg. Ideális esetben a TID exponenciális viselkedést mutatna, de a detektálás holtideje miatt ez az eloszlás torzul. A 4. ábrán látható a tranziens mérés beütései között eltelt idő eloszlása. Mivel a valódi beütésszám Poisson-statisztikájú, ezért az eloszlás hasonló az exponenciálishoz, de az első 150 ns tartományban csonkított.

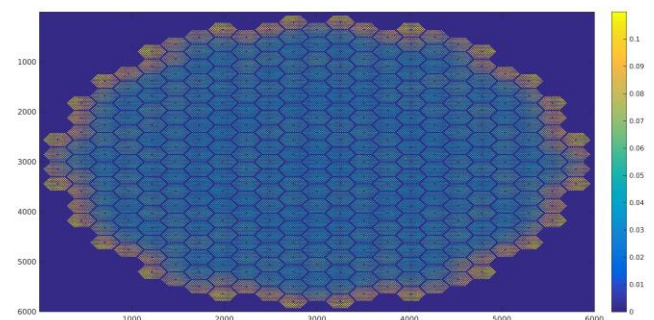


4. ábra: A tranzienskísérlet beütései között eltelt idő eloszlása

Erre alapozva a holtidőt 150 ns-nak becsültük, azonban azt tapasztaltuk, hogy a holtidő-korrekció erősen befolyásolja a mért és a szimulált értékek közötti eltérést. Hosszabb holtidőt feltételezve majdnem tökéletes egyezés hozható létre a két adatsor között, ami különösen az idősorok szubkritikus időszakára van hatással.

Konklúzió és kitekintés

A BME Nukleáris Technika Intézeténél kifejlesztett grafikus kártyákkal gyorsított időfüggő Monte Carlo-kódot mutattunk be. A GUARDYAN neutrontranszport számításokra használt módszerei, algoritmusai jellemzően eltérnek a hagyományos MC-kódokétól részben a GPU háttér, részben az explicit időfüggés miatt. Bemutattuk, hogyan lehet ezen faktorok mellett hatékonyan kezelni az időfüggő szimulációk számára kulcsfontosságú késő neutronokat, valamint demonstráltuk a kód működését egy valós tranzienskísérlet szimulációjával. A tranzienskísérletet a BME Oktatóreaktorában végre is hajtottuk, a GUARDYAN-t mért adatokkal validáltuk. A jövőben a kísérlet nyomán egy benchmark tanulmányt tervezünk készíteni, amely alkalmas lehet tranziens kódok objektív összehasonlítására. Egy már folyamatban lévő kutatás, a későneutron kezeléssel kiegészített PARTISN S_N kód, potenciálisan képes is lehet az Oktatóreaktorban végrehajtott kísérlet szimulációjára, és a közeljövőben értékes összehasonlítással szolgálhat.



5. ábra: 5ms alatt leadott teljesítmény becslésének hibája VVER-440 zóna pálcáhuszádban

A GUARDYAN-nel [18] lehetséges továbbá VVER-440 reaktorzonák vizsgálata is: egy tranziensanalízis hozzávetőleg 50 óra/1 valós másodperc futásidő igényű egyetlen Nvidia GTX 1080 GPU kártyán. Ennyi idő alatt az

5 ms időintervallumban egy pálcáhozadban leadott teljesítmény statisztikus szórása néhány százaléknyi, ahogyan azt az 5. ábra szemlélteti.

Köszönetnyilvánítás

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott.

Irodalomjegyzék

- [1] E. Brun, F. Damian, C. Diop, E. Dumonteil, F. Hugot, C. Jouanne, Y. Lee, F. Malvagi, A. Mazzolo, O. Petit, J. Trama, T. Visonneau, A. Zoia, TRIPOLI-4, CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code, *Annals of Nuclear Energy* 82 (2015) 151-160, doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.053>.
- [2] P. K. Romano, N. E. Horelik, B. R. Herman, A. G. Nelson, B. Forget, K. Smith, OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development, *Annals of Nuclear Energy* 82 (2015) 90-97, doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.048>.
- [3] J. Leppanen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, T. Kaltiaisenaho, The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013, *Annals of Nuclear Energy* 82 (2015) 142-150, doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.
- [4] A. G. Mylonakis, M. Varoayanni, D. Grigoriadis, N. Catsaros, Developing and investigating a pure Monte-Carlo module for transient neutron transport analysis, *Annals of Nuclear Energy* 104 (2017) 103-112, doi:[10.1016/j.anucene.2016.12.039](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.12.039).
- [5] J. Leppanen, Development of a dynamic simulation mode in Serpent 2 Monte Carlo code, *Proceedings of the International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2013)* (2013) 5-9.
- [6] V. Valtavirta, M. Hesan, J. Leppanen, Delayed neutron emission model for time dependent simulations with the Serpent 2 Monte Carlo code - first results, in: *Proceedings of the International Conference on the Physics of Reactors (PHYSOR2016)*, American Nuclear Society, Sun Valley, Idaho, USA, 2016.
- [7] L. Russell, A. Buijs, G. Jonkmans, G4-STORK: A Monte Carlo reactor kinetics simulation code, *Nuclear Science and Engineering* 176 (3) (2014) 370-375, doi:[10.13182/nse13-8](https://doi.org/10.13182/nse13-8).
- [8] B. L. Sjenitzer, J. E. Hoogenboom, Dynamic Monte Carlo method for nuclear reactor kinetics calculations, *Nuclear Science and Engineering* 175 (1) (2013) 94-107, doi:[10.13182/nse12-44](https://doi.org/10.13182/nse12-44).
- [9] N. Shaukat, 670 M. Ryu, H. J. Shim, Dynamic Monte Carlo transient analysis for the organization for economic co-operation and development nuclear energy agency (OECD/NEA) C5G7-TD benchmark, *Nuclear Engineering and Technology* 49 (5) (2017) 920-927, doi:[10.1016/j.net.2017.04.008](https://doi.org/10.1016/j.net.2017.04.008).
- [10] A. Srivastava, K. Singh, S. Degweker, Monte Carlo methods for reactor kinetic simulations, *Nuclear Science and Engineering* (2017) 1-19, doi:[10.1080/00295639.2017.1388091](https://doi.org/10.1080/00295639.2017.1388091).
- [11] M. Faucher, D. Mancusi, A. Zoia, New kinetic simulation capabilities for Tripoli-4: Methods and applications, *Annals of Nuclear Energy* 120 (2018) 74-88, doi:[10.1016/j.anucene.2018.05.030](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.05.030).
- [12] T. Booth, A weight (charge) conserving importance-weighted comb for Monte Carlo, *Tech. rep.*, Los Alamos National Lab., NM (United States) (1996).
- [13] B. L. Sjenitzer, J. E. Hoogenboom, Variance reduction for fixed-source Monte Carlo calculations in multiplying systems by improving chain-length statistics, *Annals of Nuclear Energy* 38 (10) (2011) 2195-2203, doi:[10.1016/j.anucene.2011.06.013](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.013).
- [14] B. Molnar, G. Tolnai, D. Legrady, A GPU based direct Monte Carlo simulation of time dependence in nuclear reactors, submitted to *Annals of Nuclear Energy* on 2018.12.06.
- [15] D. Legrady, J. E. Hoogenboom, Scouting the feasibility of Monte Carlo reactor dynamics simulations, in: *Proceedings of the International Conference on the Physics of Reactors 2008 (PHYSOR08)*, Paul Scherrer Institut, Interlaken, Switzerland, 2008.
- [16] G. Klujber, M. Szieberth, Benchmark description of the BME Training Reactor, *Tech. rep.*, Budapest University of Technology and Economics, Institute of Nuclear Techniques, Budapest, Hungary (2018).
- [17] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1989.
- [18] <http://awing.reak.bme.hu/GUARDYAN>