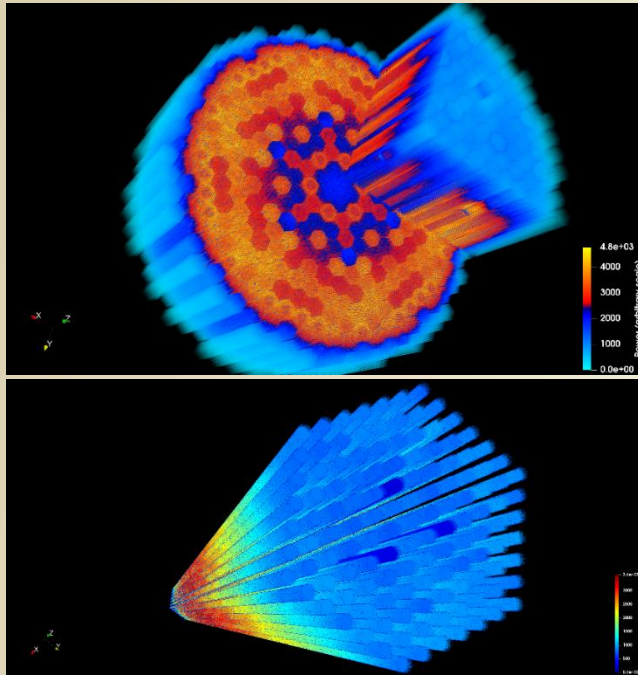


Fermi Fiatal Kutatói Díj 2025 előadás: A Dinamikus Monte Carlo módszer és csatolásának termohidraulikai megoldóval modellezése sztochasztikus differenciálegyenletekkel



Előadó:

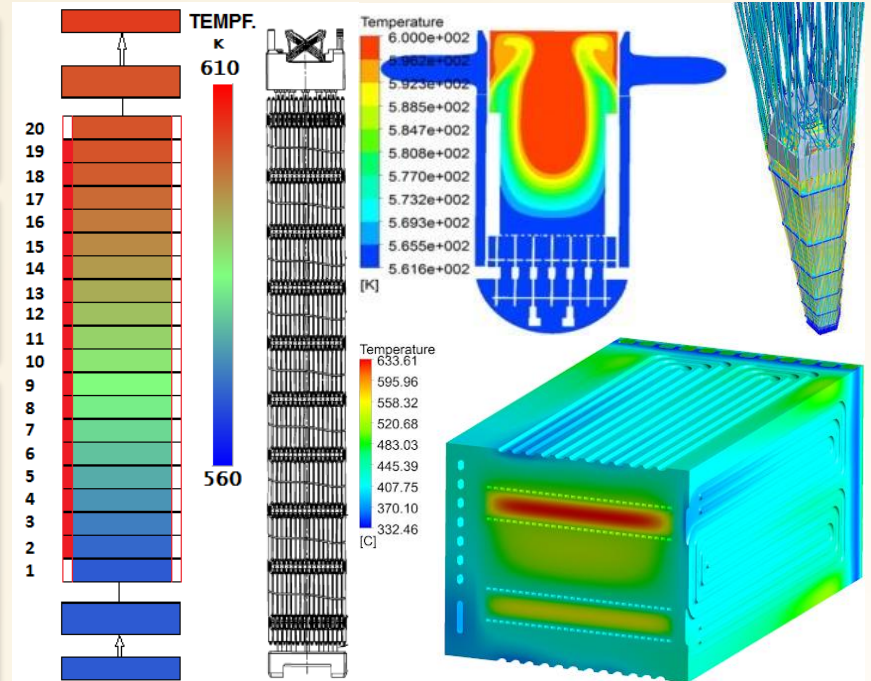
Hajas Tamás Zoltán

Témavezető:

Dr. Légrády Dávid

Fizikai Tudományok Doktori
Iskola

(Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem)

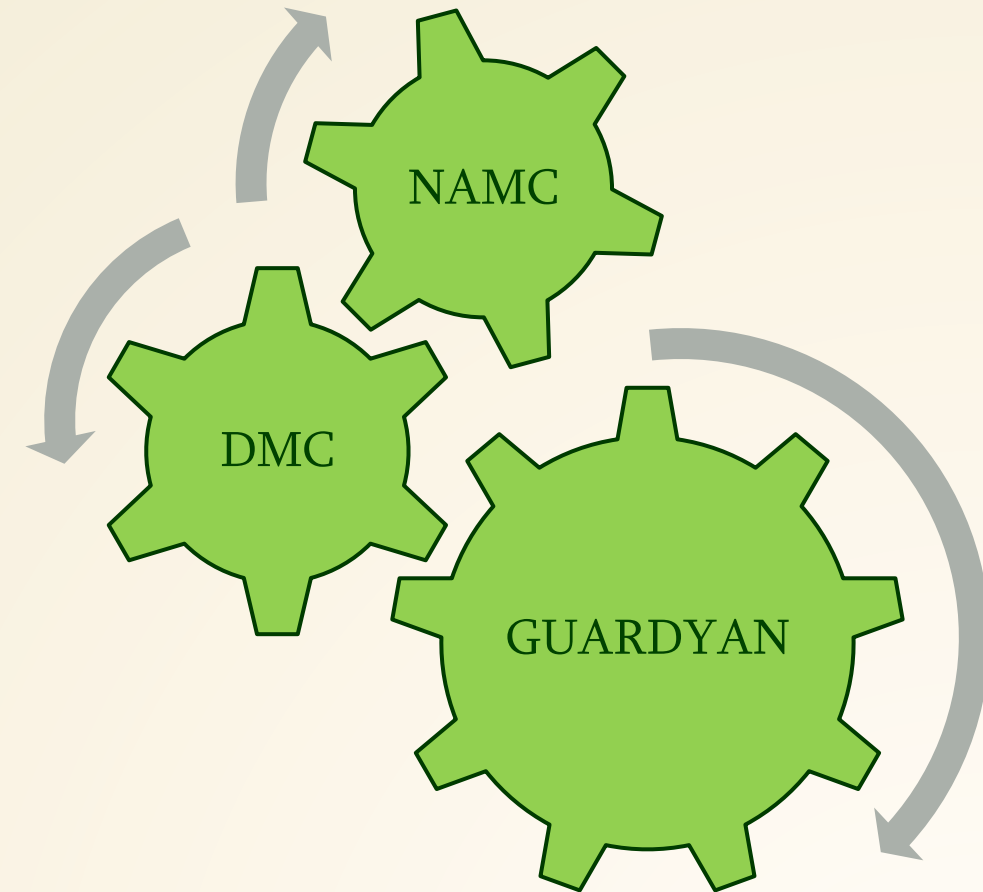


- Boltzmann-egyenlet a neutrontranszport leírására:

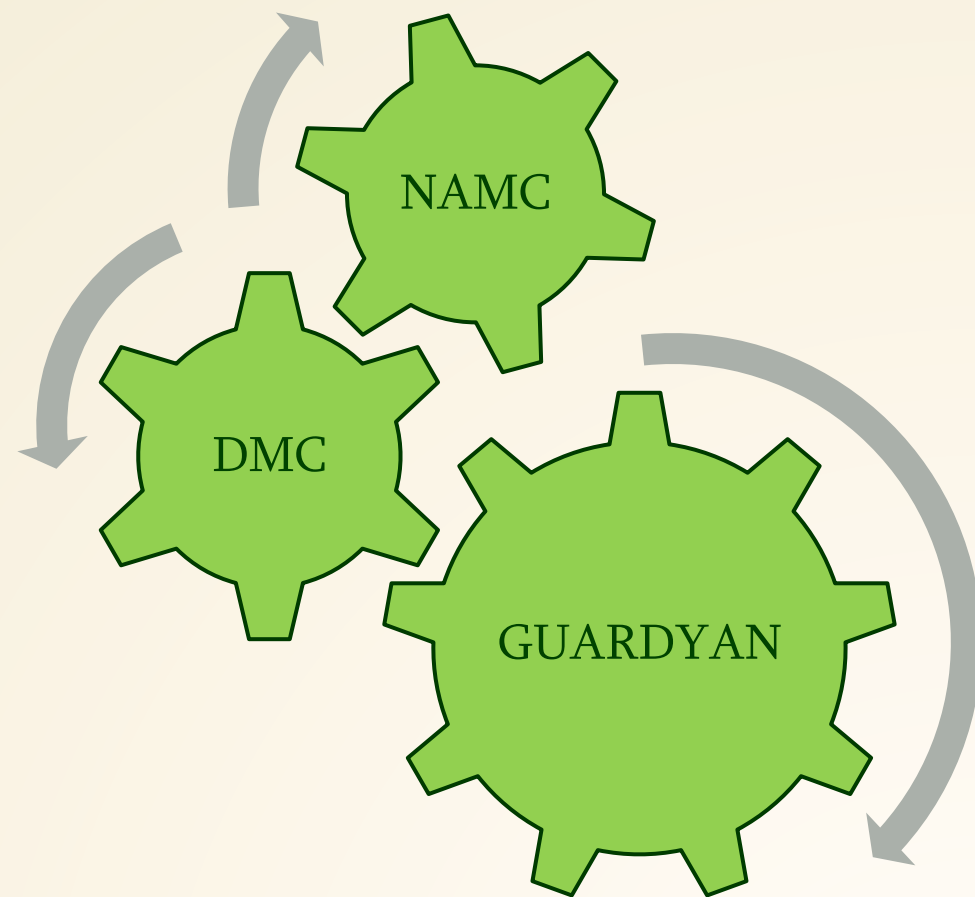
$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Psi(\underline{r}, \underline{\Omega}, E, t)}{\partial t} = -\underline{\Omega} \cdot \underline{\nabla} \Psi(\underline{r}, \underline{\Omega}, E, t) - \Sigma^t(\underline{r}, E, t) \Psi(\underline{r}, \underline{\Omega}, E, t) + S(\underline{r}, \underline{\Omega}, E, t) + \sum_{d=1}^D \chi^d(E) \lambda_d C_d(\underline{r}, t)$$

$$\frac{\partial C_d(\underline{r}, t)}{\partial t} = -\lambda_d C_d(\underline{r}, t) + \int \int_{4\pi} \beta_d(\underline{r}, E', t) v(\underline{r}, E', t) \Sigma^f(\underline{r}, E', t) \Psi(\underline{r}, \underline{\Omega}', E', t) dE' d\underline{\Omega}'$$

- Monte Carlo módszer: integrálegyenletek megoldása pszeudo-random számokkal
- A neutrontranszport megoldási lehetőségei Monte Carlo (MC) módszerrel:
 - a) Statikus (SMC) -> II. típusú Fredholm-integrálegyenlet
 - b) Dinamikus (DMC) -> ?
- A Monte Carlo módszer mintavételezi a neutronpopulációt a különböző reakciók szempontjából
- Nemanalóg technikák szükségesek a szórás csökkentésére torzítatlan várható érték mellett: szóráscsökkentés
- Egy DMC kód kiszámítja a neutronfluxust a fázistér egy $(\underline{r} + d\underline{r}, \underline{\Omega} + d\underline{\Omega}, E + dE, t + dt)$ tartományában



- Világszerte CPU klasztereken futó **dinamikus Monte Carlo neutronkinetikai kódok** (dynTRIPOLI, dynSerpent)
 - GPU-n futó DMC kód fejlesztése a Nukleáris Technikai Intézetben: **GUARDYAN** (GpU Assisted Reactor DYnamic ANalysis)
 - A Monte Carlo kódokat világszerte **csatolják determinisztikus termohidraulikai kódokhoz** statikus vagy dinamikus számítások végzése miatt
 - Csatoláskor a Monte Carlo módszer **sztochasztikus tulajdonsága átkerül** a termohidraulikára
 - Időfüggő, többdimenziós Monte Carlo és termohidraulika nemlineáris, csatolt rendszere esetén **nincs matematikai eszköz a stabilitás és konvergencia vizsgálatára**
1. **Hogyan vizsgálható vagy közelíthető a sztochasztikus, nemlineáris, csatolt rendszer stabilitása és konvergenciája?**
 2. **Egy adekvált matematikai eszköz milyen kritériumokat ad a különböző stabilitási és konvergencia tulajdonságokra?**



- A kutatás 3 fő előzménye:

I. DMC kód fejlesztése a BME Nukleáris Technikai Intézetében: **GUARDYAN**. Benchmark feladatokkal **tesztelt** és Oktatóreaktori és Paksi atomerőművi mérésekkel **validált** kód. A SUBCHANFLOW termohidraulikai kóddal tud csatolva számítani.

- [1] Molnar, B.; Tolnai, G.; Legrady D. A GPU-based direct Monte Carlo simulation of time dependence in nuclear reactors. *Annals of Nuclear Energy* (2019) 132, pp. 46-63. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.03.024>
- [2] Legrady, D.; Halasz, M.; Kophazi, J.; Molnar, B.; Tolnai, G.; Population-based variance reduction for dynamic Monte Carlo. *Annals of Nuclear Energy* (2020) 149, pp. 107752. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107752>
- [3] Legrady, D.; Tolnai, G.; Hajas, T.; Pazman, E.; Parko, T.; Pos, I. Full Core Pin-Level VVER-440 Simulation of a Rod Drop Experiment with the GPU-Based Monte Carlo Code GUARDYAN. *Energies* (2022), 15, 2712. <https://doi.org/10.3390/en15082712>

II. A sztochasztikus kalkulus először Hayes és Allen munkája során került használatra a reaktorfizikában. Levezették a sztochasztikus pontkinetikai egyenletrendszert, ami a pontkinetikai egyenlet SDE formája. Az egyenlet leírja a neutronpopuláció fejlődését sztochasztikus folyamatként alacsony neutronsám esetén valós reaktorra.

- [4] Hayes, J. G.; Allen, E. J. Stochastic point-kinetics equations in nuclear reactor dynamics. *Annals of Nuclear Energy* (2005), <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2004.11.009>

III. M. Faucher a TRIPOLI-4 DMC kód és termohidraulika csatolt rendszerével végzett csatolt számításokat és először kísérelte meg SDE alkalmazásával a DMC tulajdonságait vizsgálni. **Brown-mozgást** használt a prompt neutronok és későneutron-anyamagok közötti korreláció analitikus leírására.

- [5] Faucher Margaux. Coupling between Monte Carlo neutron transport and thermal-hydraulics for the simulation of transients due to reactivity insertions. *Université Paris Saclay* (2019), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02406396>

- Megalkotható egy Itô SDE rendszer a DMC módszer modellezésére: $d\hat{X}(t) = \hat{\mu}(t, \hat{X}(t)) dt + \hat{\sigma}(t, \hat{X}(t)) d\hat{W}$
- Ennek az eljárásnak a lépései:

- 1) A neutronszám $\hat{N}_{e,g}(t)$ és prekursor szám $\hat{C}_{e,d}(t)$ kifejtése a szimulációs DMC szimulációs részecskeszámokkal:

$$\hat{N}_{e,g}(t) = \frac{\hat{N}_{e,g}(t)}{\sum_{e=1}^E \sum_{g=1}^G \hat{N}_{e,g}(t)} N^s(t) \cdot \hat{w}_{e,g}^N(t) \quad \hat{C}_{e,d}(t) = \frac{\hat{C}_{e,d}(t)}{\sum_{e=1}^E \sum_{d=1}^D \hat{C}_{e,d}(t)} C^s(t) \cdot \hat{w}_{e,d}^C(t)$$

- 2) A nem-analóg átmenet-valószínűségek $\hat{P}_r^{NAMC}(t)$ és átmenet-ráták $\Delta\hat{X}_r^{NAMC}(t)$ definiálása minden reakcióra. A használt reakciók: kiszökés (L), befogás (C), hasadás (F), szórás (S), bomlás (D), emisszió (E)

- 3) Az Itô SDE rendszer drift tagja az „r”-edik reakcióra:

$$\hat{\mu}_r = \sum_x \hat{\mu}_{r,x} \mathbf{e}_x^T = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_x \frac{\hat{P}_{r,x}}{\Delta t} \cdot \Delta\hat{X}_{r,x} \cdot \mathbf{e}_x^T$$

- 4) Az Itô SDE rendszer diffúziós tagja az „r”-edik reakcióra:

$$\hat{\sigma}_r = \sum_x \hat{\sigma}_{r,x} \mathbf{e}_x^T = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_x \sqrt{\frac{\hat{P}_{r,x}}{\Delta t}} \cdot \Delta\hat{X}_{r,x} \cdot \mathbf{e}_x^T$$

- Levezethető a Sztochasztikus Heterogén Többszoport Diffúzióegyenlet (SHeMGD):

$$d \begin{bmatrix} \hat{\phi}(t) \\ \hat{c}(t) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \hat{L}(t) + \hat{T}(t) + \hat{C}(t) + \hat{F}_1(t) + \hat{S}(t) & \hat{D}_1(t) \\ \hat{F}_2(t) & \hat{D}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{E}(t) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) dt + \sum_{r=1}^R \hat{\sigma}_r(t, \hat{\phi}, \hat{c}) d\hat{W}_r(t)$$

- **A Nem-Analóg Monte Carlo (NAMC) zajmodellek:**

$$d\hat{X}(t) = \sum_r \hat{\mu}_r(t, \hat{X}(t)) dt + \sum_r \hat{\sigma}_r(t, \hat{X}(t)) d\hat{W}_r$$

- 1) Prompt NAMC (pNAMC) zajmodell
- 2) Késő NAMC (dNAMC) zajmodell
- 3) Kétcsoport NAMC (2gNAMC) zajmodell
- 4) Tértfüggő NAMC (sNAMC) zajmodell
- 5) Teljes NAMC (cNAMC) zajmodell

- **A Sztochasztikus Pontkinetikai (SPK) egyenletnek a pNAMC zajmodellel létezik analitikus megoldása:**

- a) „Forrásmentes” eset: a megoldás a Geometriai Brown mozgás (GBM)
- b) „Forrásos” eset: a megoldás az Ornstein-Uhlenbeck (OU) folyamat

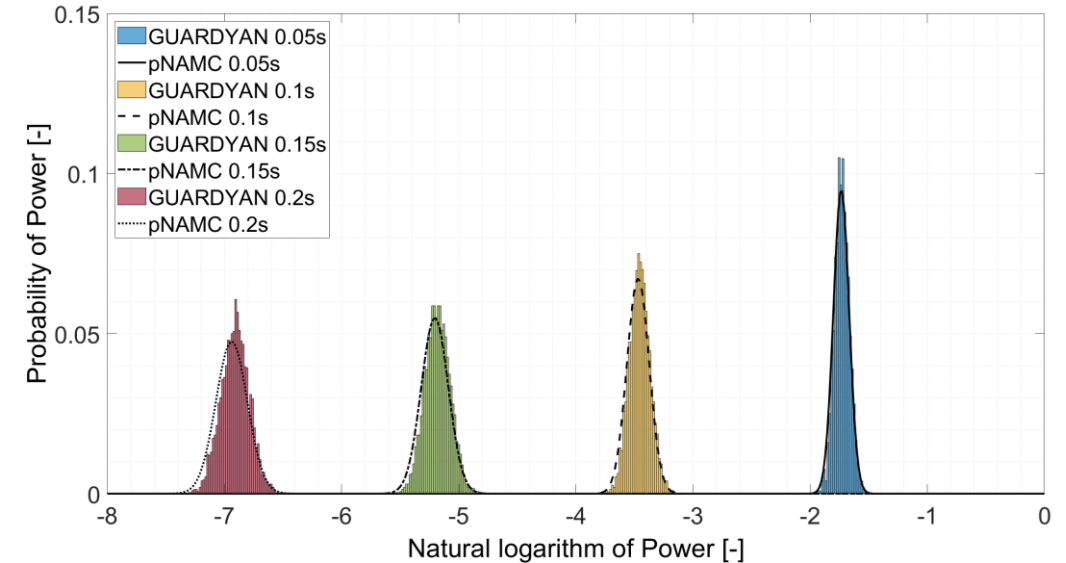
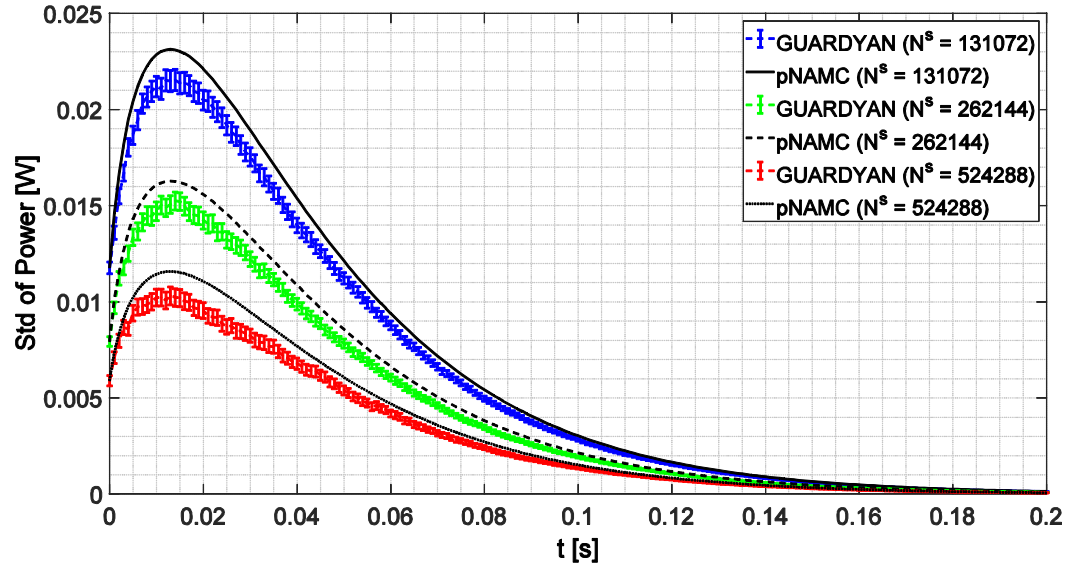
- **A „forrásmentes” esetben kifejezhető a DMC szórásának trendje és mértéke analitikus képletekkel:**

- 1) Szórásnégyzet: $\mathbb{V}[P(t)] = \mathbb{E}^2[P_0]e^{-2\frac{\rho}{\Lambda}t}(e^{\sigma^2 t} - 1) + \mathbb{V}[P_0]e^{2\frac{\rho}{\Lambda}t + \sigma^2 t}$ a szórásnégyzet ρ függvénye

- 2) Relatív szórás: $\mathbb{R}[P(t)] = \sqrt{(e^{\sigma^2 t} - 1) + \frac{\mathbb{V}[P_0]}{\mathbb{E}^2[P_0]}e^{\sigma^2 t}}$ a relatív szórás monoton nő

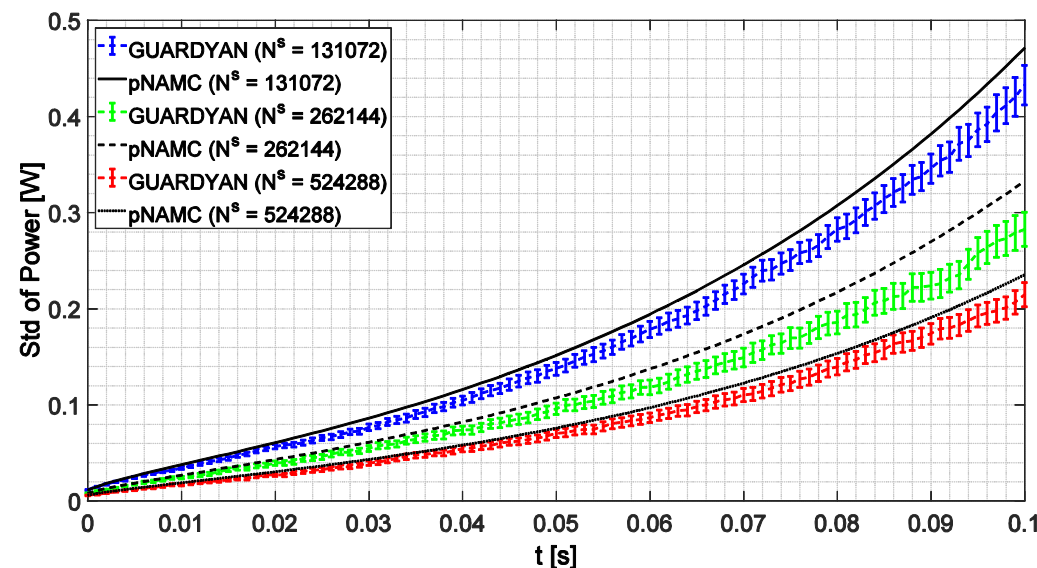
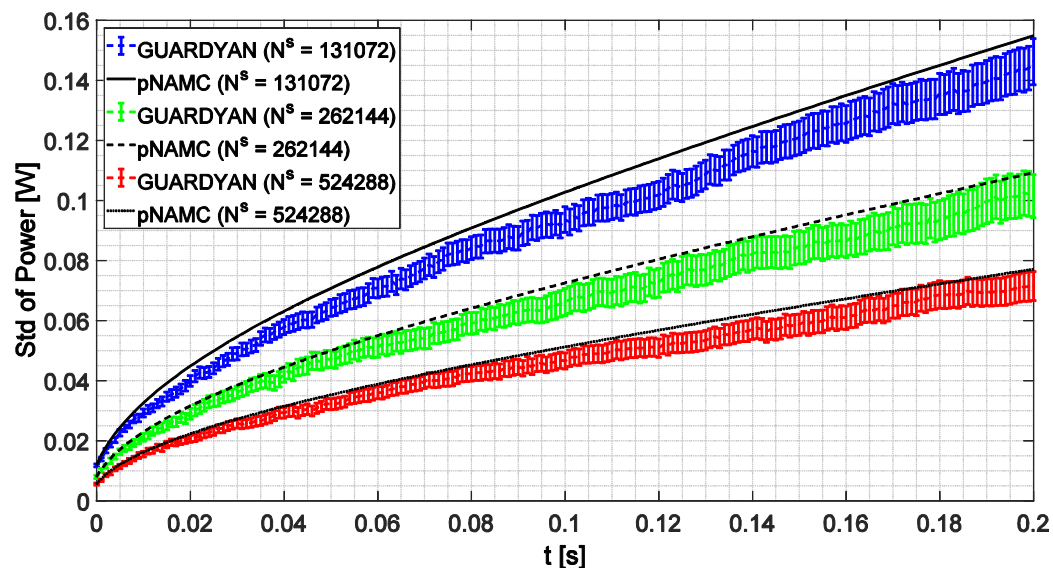
- A pNAMC és dNAMC zajmodellek validációja: **delayed eset**
 - reaktormodell: véges Homogén Urán-Víz Kocka (fHUWC)
 - használt DMC kód: GUARDYAN
 - két vizsgált eset: későneutronok nélkül és későneutronokkal
 - pNAMC esetén analitikus képletek
 - dNAMC esetén numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - a figyelembe vett szóráscsökkentő eljárások: implicit befogás (ic) és kényszerített bomlás (fd)

fHUWC	Szubkritikus	Kritikus	Szuperkritikus
a [cm]	100.0	100.0	100.0
d_{mix} [g/cm ³]	1.181	1.181	1.181
r_{U235} [-]	0.0004200	0.0004228	0.0004240
r_{U238} [-]	0.0044200	0.0044172	0.0044160
r_{H1} [-]	0.6634400	0.6634400	0.6634400
r_{O16} [-]	0.3317200	0.3317200	0.3317200
ρ [pcm]	-301.22	+5.64	+137.04



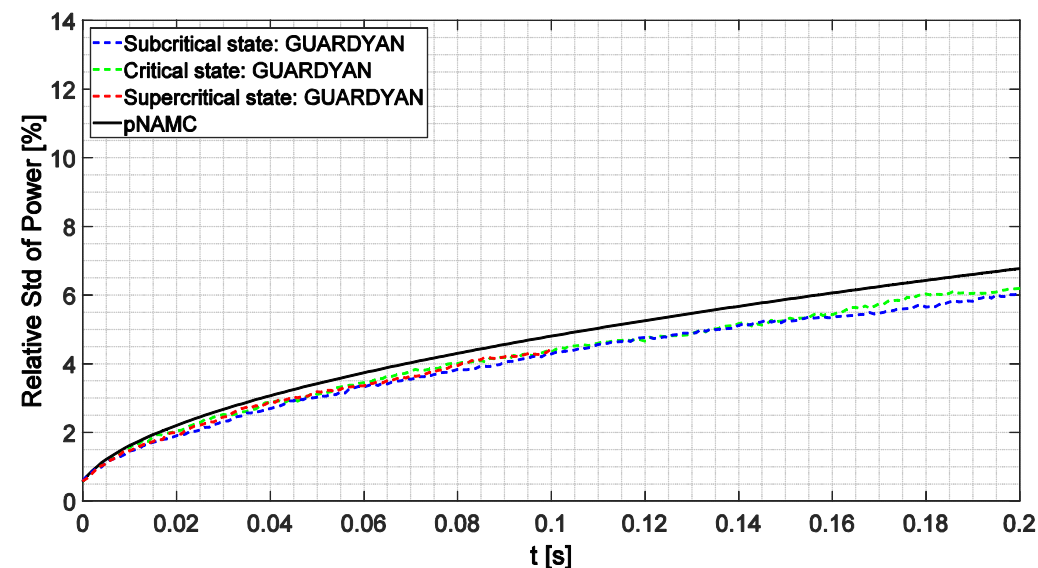
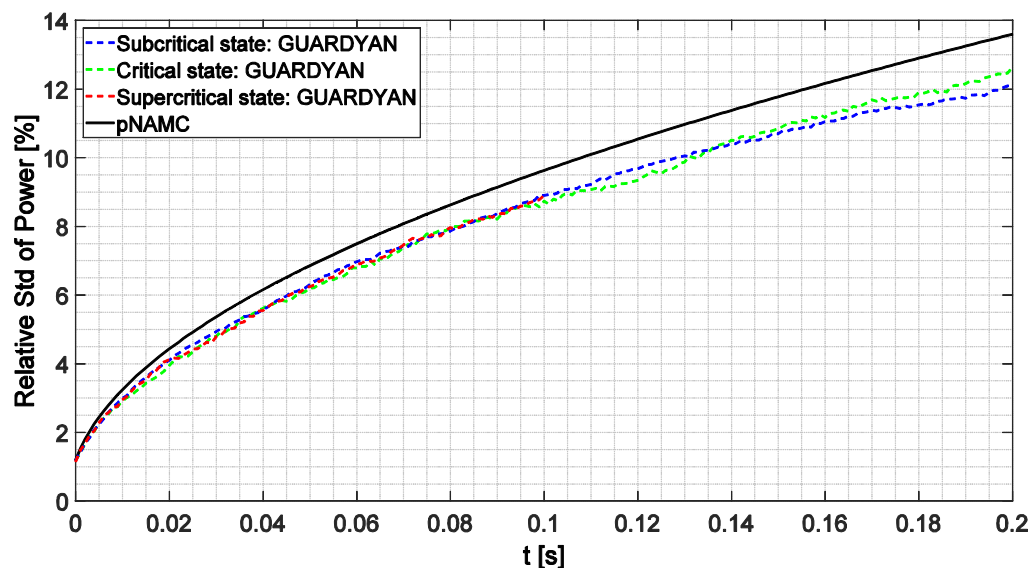
- A pNAMC és dNAMC zajmodellek validációja: **delayed eset**
 - reaktormodell: véges Homogén Urán-Víz Kocka (fHUWC)
 - használt DMC kód: GUARDYAN
 - két vizsgált eset: későneutronok nélkül és későneutronokkal
 - pNAMC esetén analitikus képletek
 - dNAMC esetén numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - a figyelembe vett szóráscsökkentő eljárások: implicit befogás (ic) és kényszerített bomlás (fd)

fHUWC	Szubkritikus	Kritkus	Szuperkritikus
a [cm]	100.0	100.0	100.0
d_{mix} [g/cm ³]	1.181	1.181	1.181
r_{U235} [-]	0.0004200	0.0004228	0.0004240
r_{U238} [-]	0.0044200	0.0044172	0.0044160
r_{H1} [-]	0.6634400	0.6634400	0.6634400
r_{O16} [-]	0.3317200	0.3317200	0.3317200
ρ [pcm]	-301.22	+5.64	+137.04



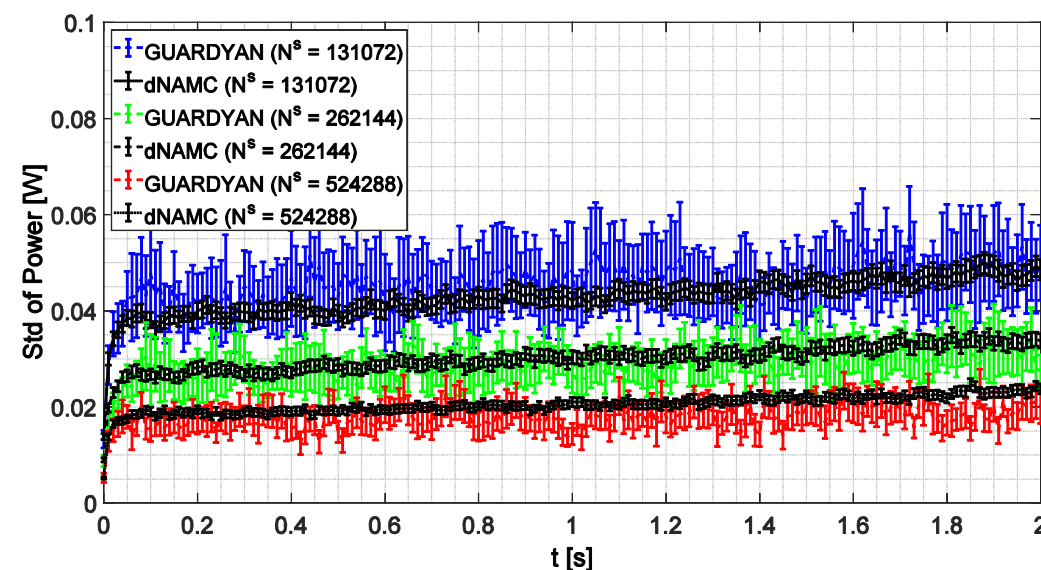
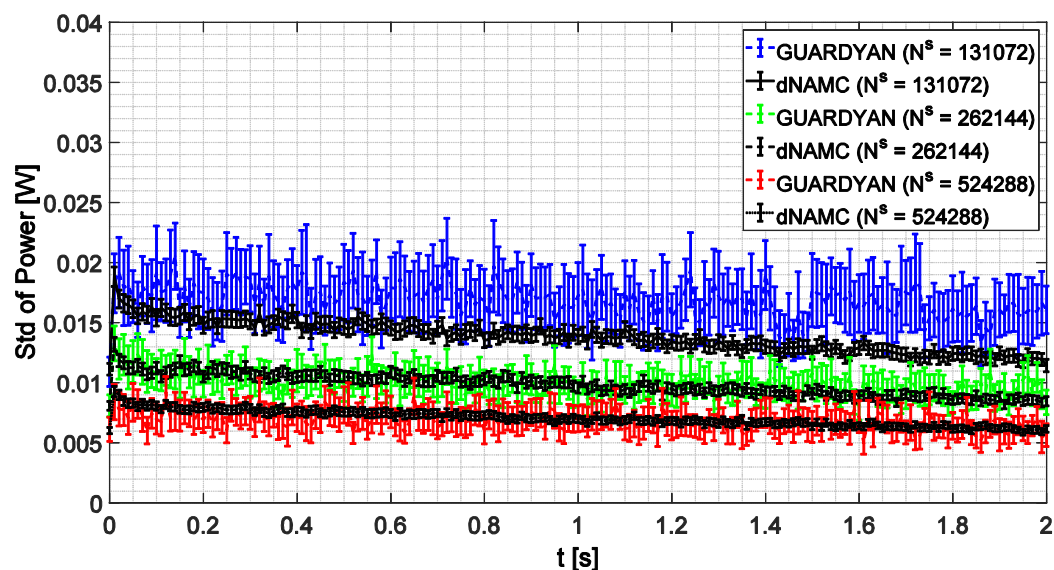
- A pNAMC és dNAMC zajmodellek validációja: **delayed eset**
 - reaktormodell: véges Homogén Urán-Víz Kocka (fHUWC)
 - használt DMC kód: GUARDYAN
 - két vizsgált eset: későneutronok nélkül és későneutronokkal
 - pNAMC esetén analitikus képletek
 - dNAMC esetén numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - a figyelembe vett szóráscsökkentő eljárások: implicit befogás (ic) és kényszerített bomlás (fd)

fHUWC	Szubkritikus	Kritkus	Szuperkritikus
a [cm]	100.0	100.0	100.0
d_{mix} [g/cm ³]	1.181	1.181	1.181
r_{U235} [-]	0.0004200	0.0004228	0.0004240
r_{U238} [-]	0.0044200	0.0044172	0.0044160
r_{H1} [-]	0.6634400	0.6634400	0.6634400
r_{O16} [-]	0.3317200	0.3317200	0.3317200
ρ [pcm]	-301.22	+5.64	+137.04



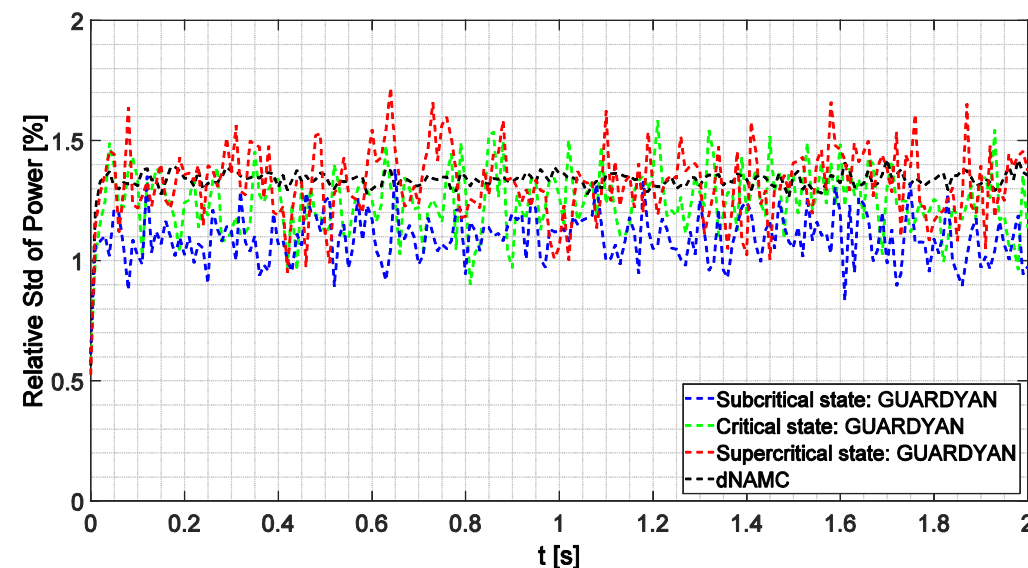
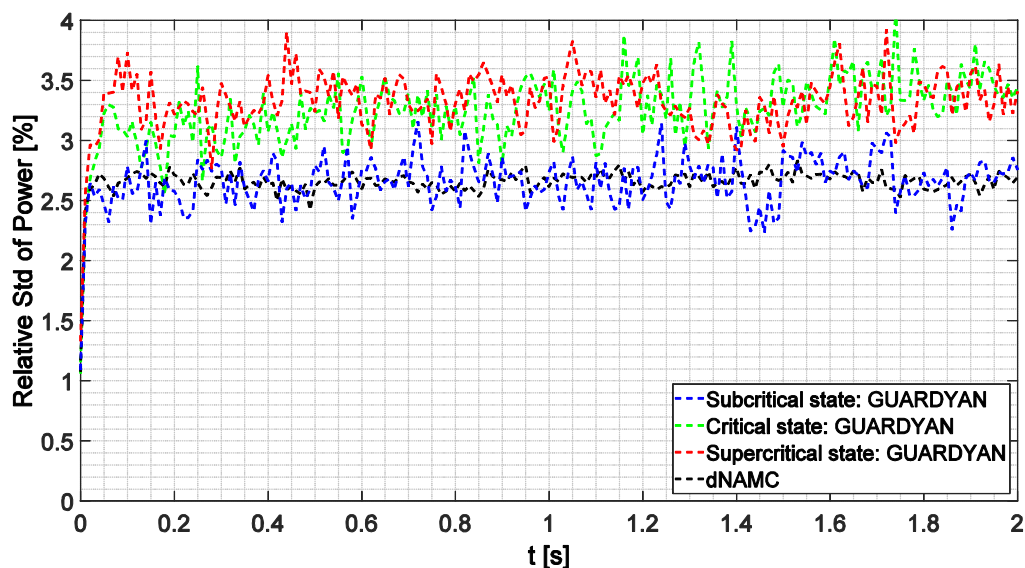
- A pNAMC és dNAMC zajmodellek validációja: **delayed eset**
 - reaktormodell: véges Homogén Urán-Víz Kocka (fHUWC)
 - használt DMC kód: GUARDYAN
 - két vizsgált eset: későneutronok nélkül és későneutronokkal
 - pNAMC esetén analitikus képletek
 - dNAMC esetén numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - a figyelembe vett szóráscsökkentő eljárások: implicit befogás (ic) és kényszerített bomlás (fd)

fHUWC	Szubkritikus	Kritkus	Szuperkritikus
a [cm]	100.0	100.0	100.0
d_{mix} [g/cm ³]	1.181	1.181	1.181
r_{U235} [-]	0.0004200	0.0004228	0.0004240
r_{U238} [-]	0.0044200	0.0044172	0.0044160
r_{H1} [-]	0.6634400	0.6634400	0.6634400
r_{O16} [-]	0.3317200	0.3317200	0.3317200
ρ [pcm]	-301.22	+5.64	+137.04



- A pNAMC és dNAMC zajmodellek validációja: **delayed eset**
 - reaktormodell: véges Homogén Urán-Víz Kocka (fHUWC)
 - használt DMC kód: GUARDYAN
 - két vizsgált eset: későneutronok nélkül és későneutronokkal
 - pNAMC esetén analitikus képletek
 - dNAMC esetén numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - a figyelembe vett szóráscsökkentő eljárások: implicit befogás (ic) és kényszerített bomlás (fd)

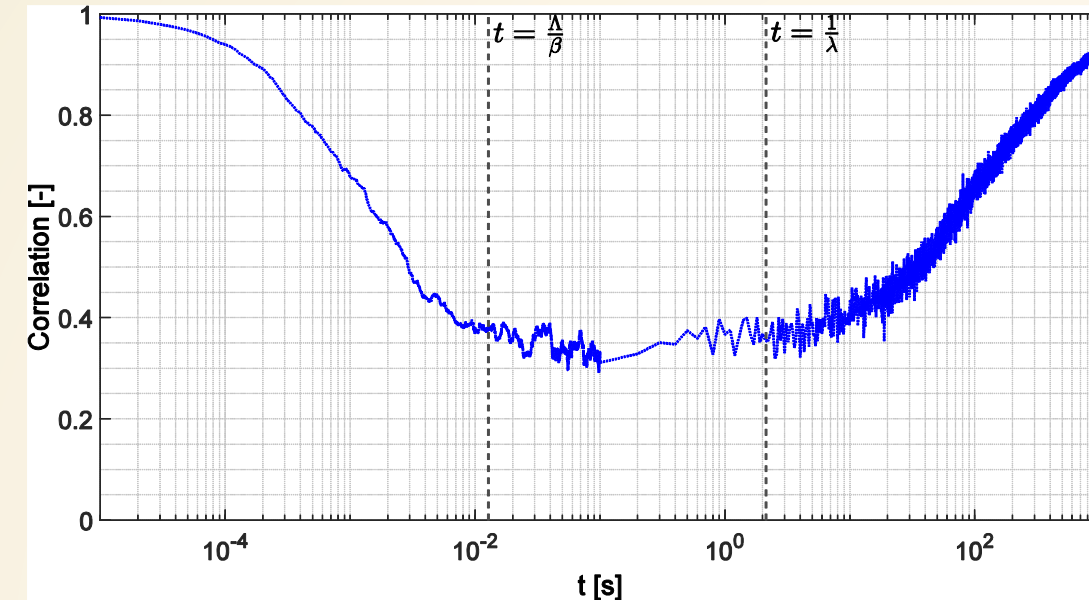
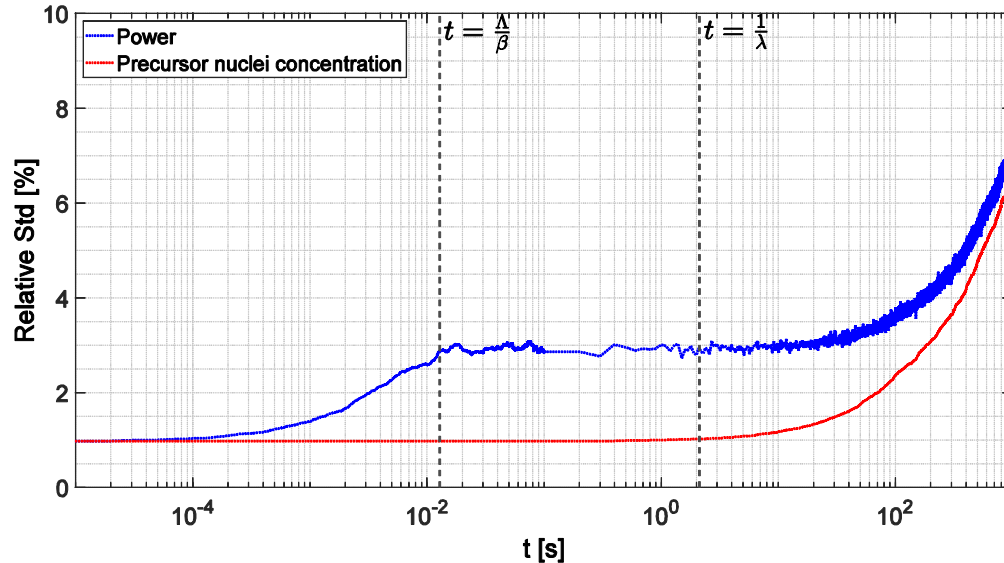
fHUWC	Szubkritikus	Kritikus	Szuperkritikus
a [cm]	100.0	100.0	100.0
d_{mix} [g/cm ³]	1.181	1.181	1.181
r_{U235} [-]	0.0004200	0.0004228	0.0004240
r_{U238} [-]	0.0044200	0.0044172	0.0044160
r_{H1} [-]	0.6634400	0.6634400	0.6634400
r_{O16} [-]	0.3317200	0.3317200	0.3317200
ρ [pcm]	-301.22	+5.64	+137.04



- Szórásvizsgálat nagyon hosszú időskálán:
 - reaktormodell: véges Homogén Urán-Víz Kocka (fHUWC)
 - dNAMC esetén numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - a figyelembe vett szóráscsökkentő eljárások: implicit befogás (ic) és kényszerített bomlás (fd)
 - nagyon hosszú időskála: 1000 s
 - nagyszámú minta: 1000 realizáció
 - túl nagy kapacitásigény DMC-hez -> szóráselőrejelzés dNAMC-cal

Kritkus

k [-]	1.00003	k_{∞} [-]	1.08747
Λ [s]	$8.65922 \cdot 10^{-5}$	v [-]	2.43806
D [cm]	$9.16767 \cdot 10^{-1}$	Σ^c [1/cm]	$1.29599 \cdot 10^{-2}$
Σ^f [1/cm]	$1.04335 \cdot 10^{-2}$	Σ^s [1/cm]	$1.43885 \cdot 10^{+0}$
β [-]	$6.76676 \cdot 10^{-3}$	λ [-]	$4.70094 \cdot 10^{-1}$



- Kényszerített hasadás együttthatójának optimalizálása:

- a sztochasztikus folyamat változójának szórását $\hat{\sigma}_r^2$ határozza meg
- a szórás csökkentés visszavezethető egy optimalizációs problémára
- kényszerített hasadás esetén úgy kell megválasztanunk $\underline{f}$ együttthatókat, hogy minél kisebb $\hat{\sigma}_r^2$ -t eredményezzen:

$$\min_{\underline{f}} U(\underline{f}) = \min_{\underline{f}} \sum_r \left(\sum_i \sum_j (\hat{\sigma}_r^2)_{i,j} \Delta t \right)$$

- a különböző zajmodellek megmutatják az optimális együttthatókat különböző esetekre
- pNAMC zajmodell:

$$f^{opt} = \frac{v \Sigma^f}{v \Sigma^f + \Sigma^s}$$

- 2gNAMC zajmodell:

$$f_g^{opt} = \frac{v_g \Sigma_g^f}{v_g \Sigma_g^f + \Sigma_g^s}$$

- kombinálhatók a zajmodellek eredményei a cNAMC zajmodellben ami visszaadja a már ismer optimumát az $\underline{f}$ együttthatóknak

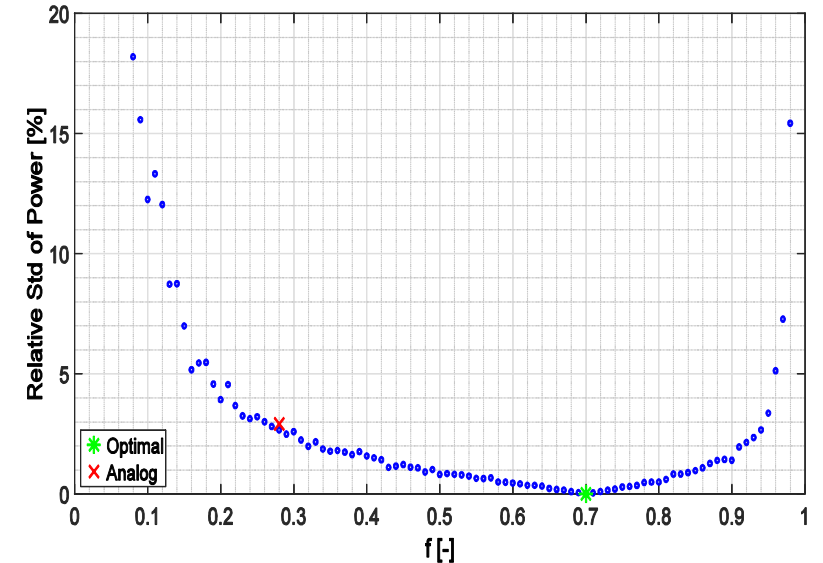
dNAMC zajmodell:

$$f^{opt} = \frac{(1 - \beta) v \Sigma^f}{(1 - \beta) v \Sigma^f + \Sigma^s}$$

sNAMC zajmodell:

$$f_e^{opt} = \frac{v_e \Sigma_e^f}{v_e \Sigma_e^f + \Sigma_e^s}$$

fHUWC	Szubkritikus	Kritikus	Szuperkritikus
ρ [pcm]	-7692.31	0.0	+284.9
v [cm/s]	$2.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$
v [-]	2.5	2.5	2.5
Σ^c [1/cm]	0.4400	0.4200	0.4192
Σ^f [1/cm]	0.2600	0.2800	0.2808
Σ^s [1/cm]	0.3000	0.3000	0.3000



- Szórás csökkentés kényszerített korrelációval:

- a sztochasztikus folyamat változójának szórását $\hat{\sigma}_r^2$ határozza meg
- az átmenet-valószínűségeket és átmenet-rátákat önkényesen definiáljuk nem-analóg neutrontranszport esetén
- új reakciók behozásával akár szórást is csökkenthetünk
- a determinisztikus folyamatok (pl kényszerített bomlás) szórása a legkisebb, olyanokat kell konstruálni
- lehetséges eljárás: **kényszerített korreláció**

fHUWC	Szubkritikus	Kritikus	Szuperkritikus
ρ [pcm]	-7692.31	0.0	+284.9
v [cm/s]	$2.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$
ν [-]	2.5	2.5	2.5
Σ^c [1/cm]	0.4400	0.4200	0.4192
Σ^f [1/cm]	0.2600	0.2800	0.2808
Σ^s [1/cm]	0.3000	0.3000	0.3000

1. Átmenet-valószínűségek:

$$\hat{P}_c^{fc} = 1 \quad \hat{P}_F^{fc} = N^s (\Sigma^f + \mathbf{B}^{ff} [f \hat{\Sigma}^t - \Sigma^f]) \nu \Delta t$$

$$\hat{P}_c^{fc} = (1 - \mathbf{B}^{ic}) \Sigma^c \nu \Delta t \quad \hat{P}_S^{fc} = N^s (\hat{\Sigma}^s + \mathbf{B}^{ff} [(1 - f) \hat{\Sigma}^t - \hat{\Sigma}^s]) \nu \Delta t$$

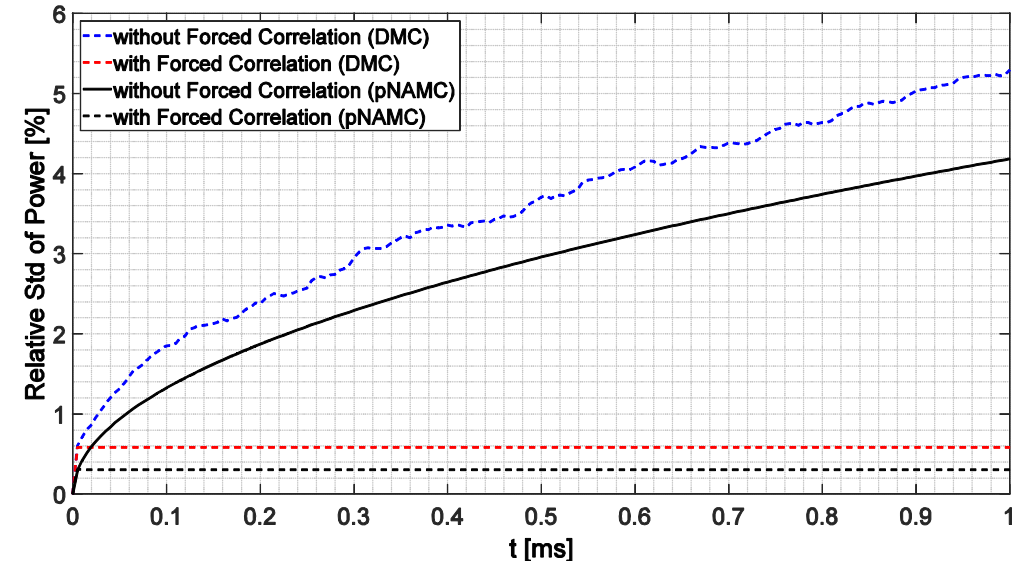
2. Átmenet-ráták:

$$[\Delta \hat{\Phi}]_c^{fc} = \sum_r \hat{P}_r^{fc} \hat{R}_r^{fc} [\bar{w}_c^\Phi]$$

$$[\Delta \hat{\Phi}]_F^{fc} = \hat{R}_F^{fc} [\bar{w}^\Phi - \bar{w}_c^\Phi]$$

$$[\Delta \hat{\Phi}]_c^{fc} = \hat{R}_c^{fc} [\bar{w}^\Phi - \bar{w}_c^\Phi]$$

$$[\Delta \hat{\Phi}]_S^{fc} = \hat{R}_S^{fc} [\bar{w}^\Phi - \bar{w}_c^\Phi]$$



I. A Sztochasztikus Egyszerűsített Alacsony-Dimenziós Csatolt PWR (SSLDC-PWR) egyenlet:

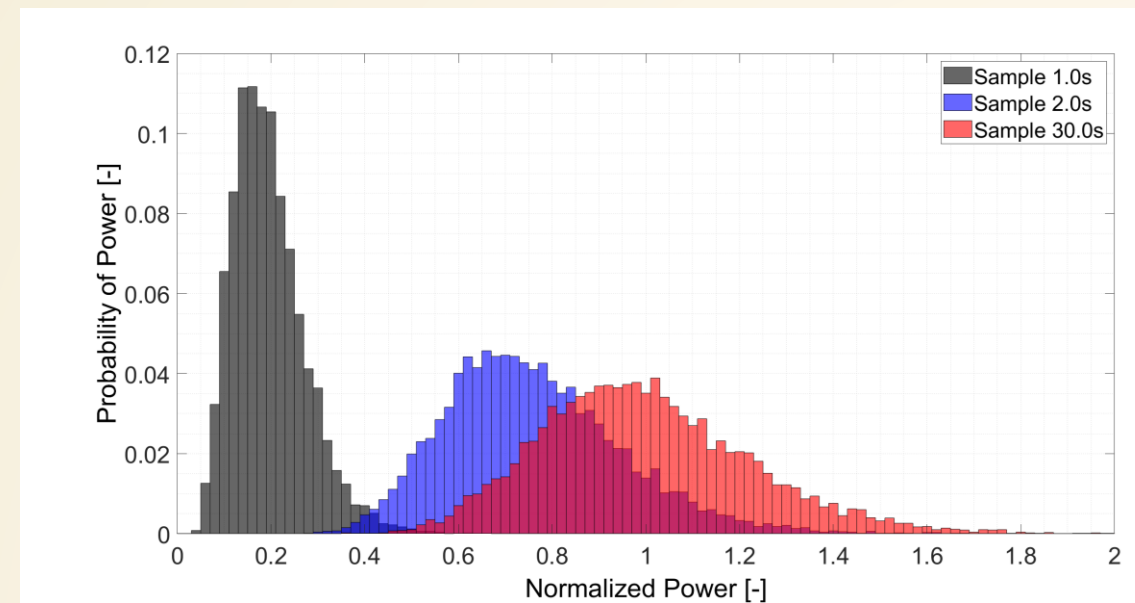
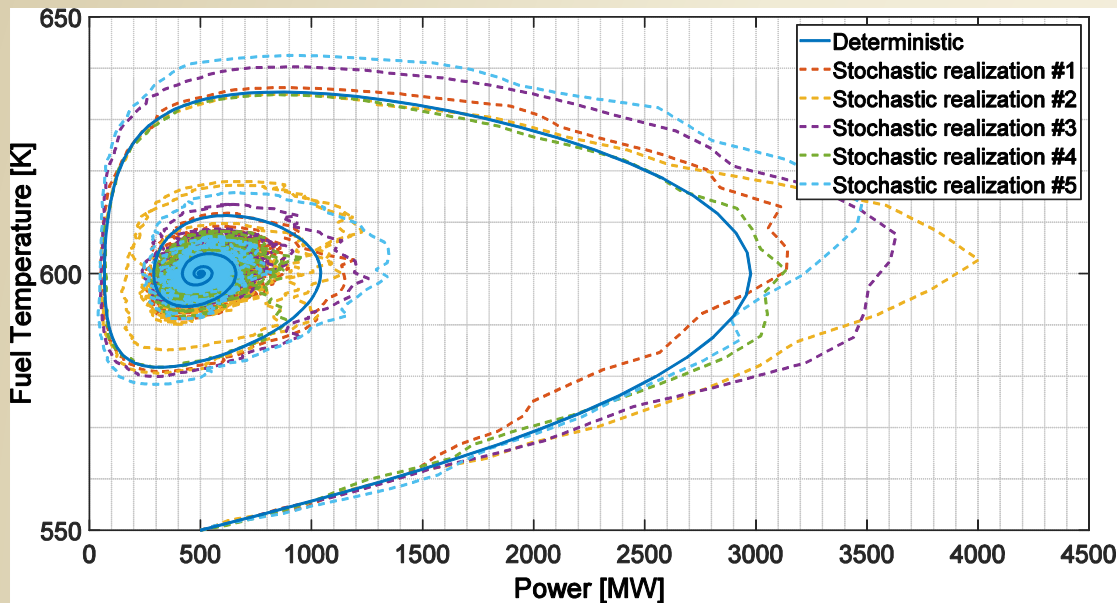
$$d \begin{bmatrix} P \\ T_f \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \left[\frac{\rho_{ex} - \alpha_f(T_f - T_{f,ref})}{\Lambda} \quad 0 \right] \\ \left[\frac{1}{C_f} \quad -\frac{H}{C_f} \right] \end{pmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S^P \\ \frac{Q^f}{C_f} + \frac{H}{C_f} T_i \end{bmatrix} dt + \begin{pmatrix} \sigma_E^p & \sigma_N^p P \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dW_E \\ dW_P \end{pmatrix}$$

II. A Sztochasztikus Fejlett Alacsony-Dimenziós Csatolt PWR (SALDC-PWR) egyenlet:

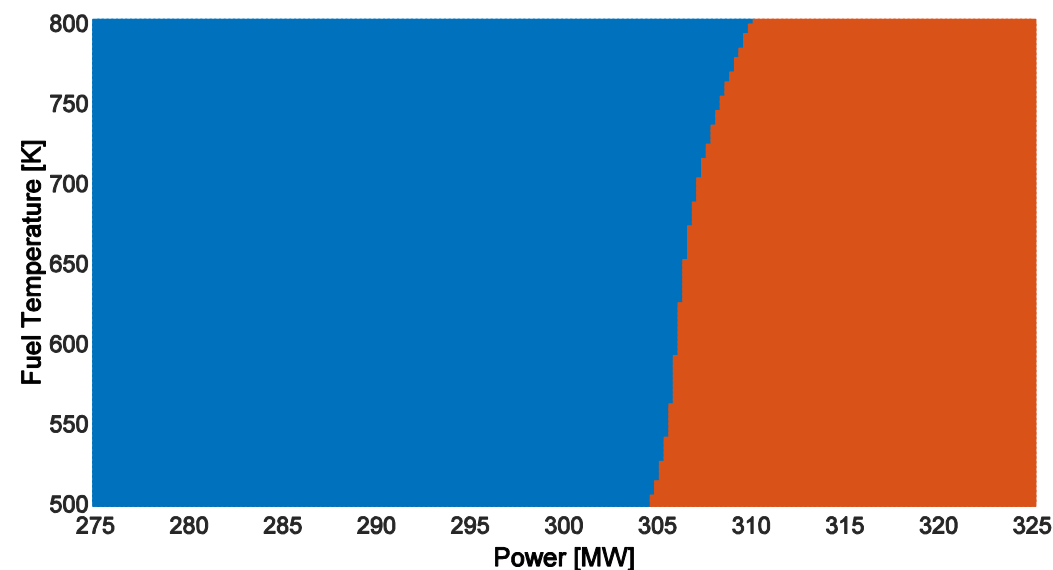
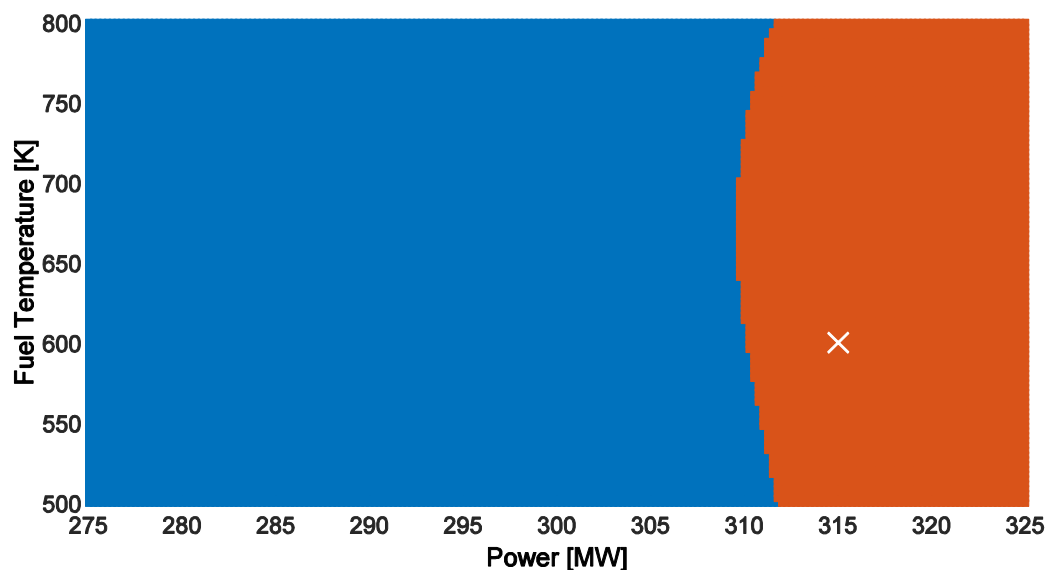
$$d \begin{bmatrix} N \\ C \\ T_f \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \left[\frac{\rho_{ex} + \rho_f + \rho_c - \beta}{\Lambda} & \lambda & 0 & 0 \right] \\ \left[\frac{\beta}{\Lambda} & -\lambda & 0 & 0 \right] \\ \left[\frac{f \varepsilon \Sigma^f v V_f}{c_f d_f V_f} & 0 & -\frac{h_{fc} A_{fc}}{c_f d_f V_f} & \frac{h_{fc} A_{fc}}{c_f d_f V_f} \right] \\ \left[\frac{(1-f) \varepsilon \Sigma^f v V_f}{c_c d_c V_c} & 0 & \frac{h_{fc} A_{fc}}{c_c d_c V_c} & -\frac{h_{fc} A_{fc} + 2 \dot{m}_c c_c}{c_c d_c V_c} \right] \end{pmatrix} \begin{bmatrix} N \\ C \\ T_f \\ T_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S^N \\ 0 \\ \frac{1}{c_f d_f V_f} \dot{Q}_{T_f} \\ \frac{2 \dot{m}_c c_c}{c_c d_c V_c} T_i \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \underline{\sigma}_E^d & \underline{\sigma}_C^d C & \underline{\sigma}_N^d N \\ \underline{0} & \underline{0} & \underline{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dW_E \\ dW_C \\ dW_N \end{bmatrix}$$

- Analitikusan megkapható a szórásnégyzet a lineáris SSLDC-PWR egyenletre a „forrásmentes” és „forrásos” esetekre:
 - a konvektív hőelvonás képes kivonni a rendszerbe bevitt zajt (ha $H > 0$ és $\mathbb{V}[P(t)] \rightarrow 0$, akkor $\mathbb{V}[T_f(t)] \rightarrow 0$)
 - a képletek nevezőjében található a H paraméter -> jelenléte csökkenti a zajt

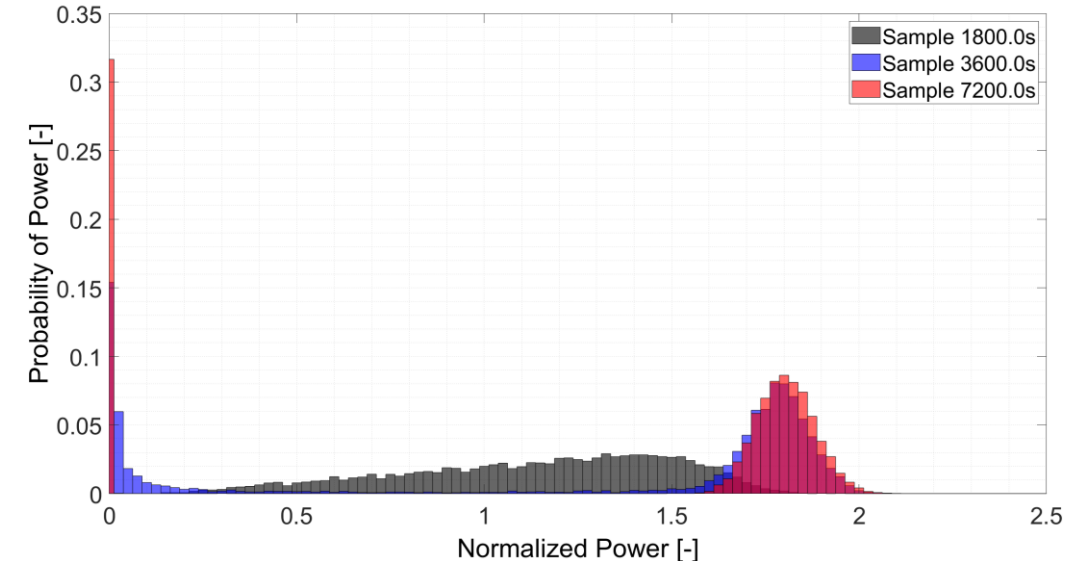
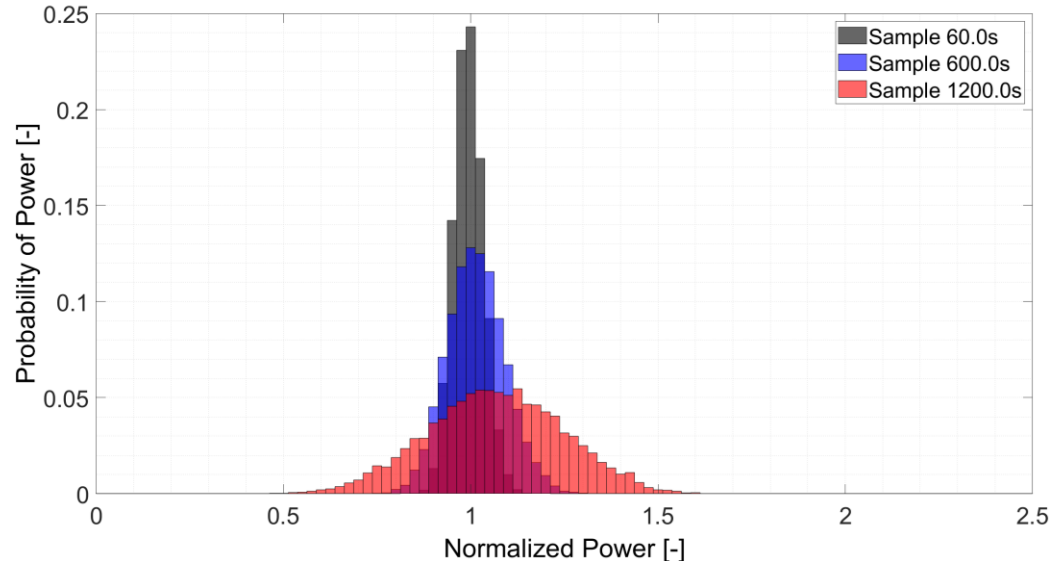
- Sztochasztikus stabilitásvizsgálat: **SSLDC-PWR egyenlet**
 - paraméterek: Csatolt Rendszer Egy Attraktorkal (CSwOA)
 - fixpont keresés analitikus módon -> két darab fixpont és egy darab determinisztikusan stabil egyensúlyi állapot
 - az SSLDC egyenleten pNAMC zajmodell -> numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - időskála: 30 s szimulációs neutrons szám: 10^5 mintaszám: 1000 realizáció
 - a stabil fixpont stabilizálja a szórást, a trajektóriák az egyensúlyi állapot körül keringenek
 - a változók (P és T_f) valószínűségi sűrűségfüggvényei (pdf) unimodálisak -> az egyensúlyi állapot sztochasztikusan is stabil



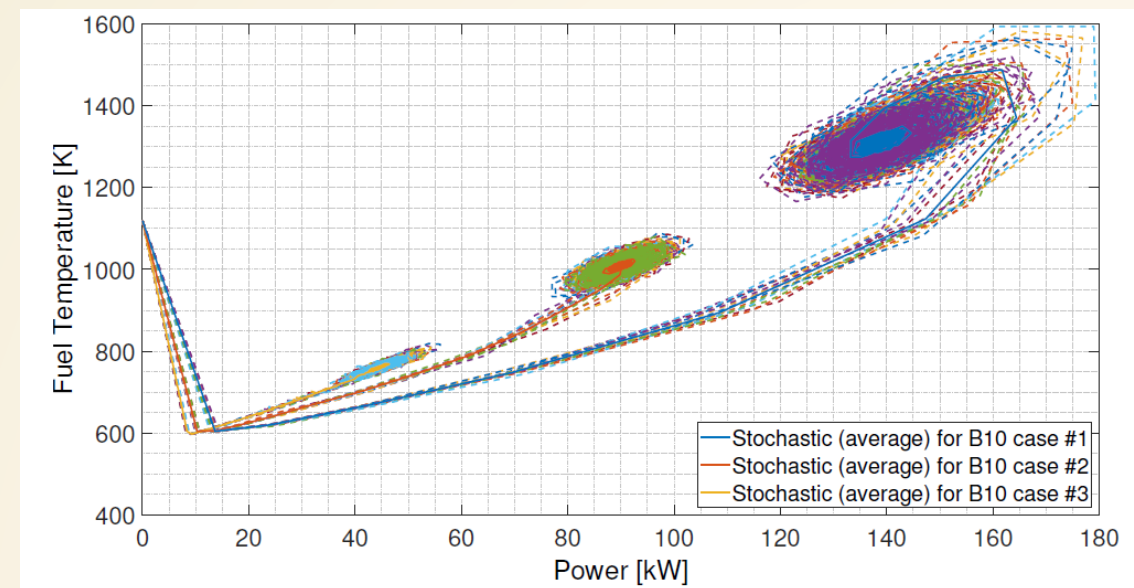
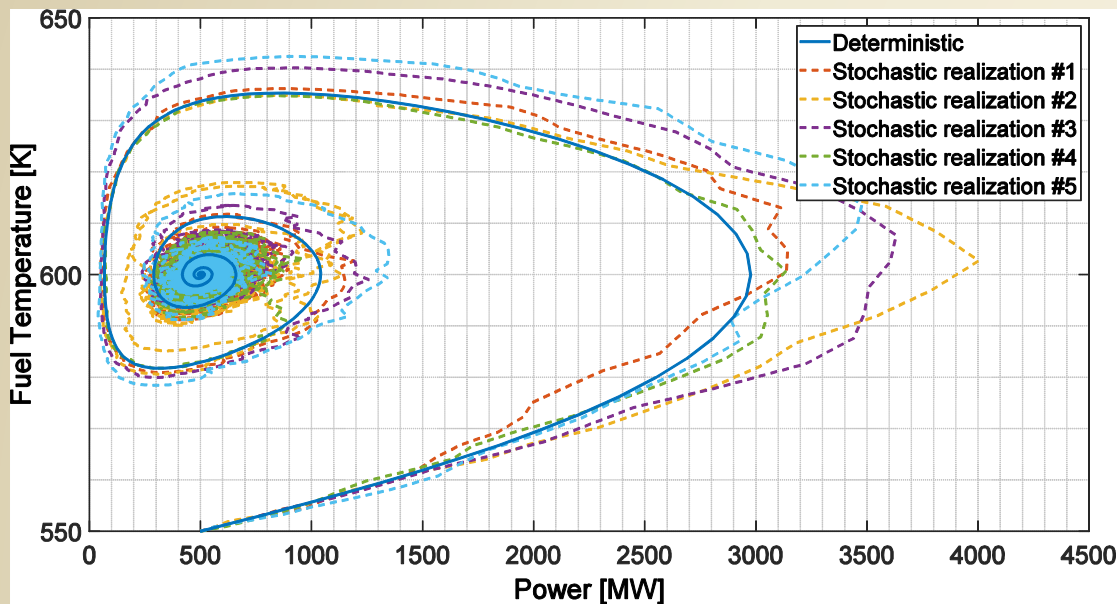
- Sztochasztikus stabilitásvizsgálat: **SALDC-PWR egyenlet**
 - paraméterek: Csatolt Rendszer Több Attraktorról (CSwMAs)
 - fixpont keresés numerikus módon -> öt darab fixpont és két darab determinisztikusan stabil egyensúlyi állapot
 - az SALDC egyenleten dNAMC zajmodell -> numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - időskála: 7200 s szimulációs neutrons szám: 10^5 mintaszám: 1000 realizáció
 - az attraktoroknak külön vonzási tartományaik vannak -> a végállapot a kezdeti állapot függvénye
 - a változók (P , C és T_f , T_c) valószínűségi sűrűségfüggvényei (pdf) bimodálisak -> sztochasztikusan stabil és metastabil állapotok
 - a hagyományos várhatóérték és szórásnégyzet operátorok félrevezetőek bimodális pdf esetén -> részletes vizsgálat szükséges



- Sztochasztikus stabilitásvizsgálat: **SALDC-PWR egyenlet**
 - paraméterek: Csatolt Rendszer Több Attraktorról (CSwMAs)
 - fixpont keresés numerikus módon -> öt darab fixpont és két darab determinisztikusan stabil egyensúlyi állapot
 - az SALDC egyenleten dNAMC zajmodell -> numerikus szimuláció IEM módszerrel
 - időskála: 7200 s szimulációs neutrons szám: 10^5 mintaszám: 1000 realizáció
 - az attraktoroknak külön vonzási tartományaik vannak -> a végállapot a kezdeti állapot függvénye
 - a változók (P , C és T_f , T_c) valószínűségi sűrűségfüggvényei (pdf) bimodálisak -> sztochasztikusan stabil és metastabil állapotok
 - a hagyományos várhatóérték és szórásnégyzet operátorok félrevezetőek bimodális pdf esetén -> részletes vizsgálat szükséges



- Csatolt DMC szimulációk mint sztochasztikus dinamikai rendszerek:
 - reaktormodell : Three Mile Island (TMI) [Legrady et. al. (2023)]
 - GUARDYAN: a forráskonvergencia fázis (teljesítmény renormálás kikapcsolva) kijelöli az egyensúlyi állapotát mindhárom bórsavkoncentráció esetén és azok körül keringenek a trajektóriák
 - Ez nagyon hasonló viselkedés mint amit az SSLDC egyenlet + pNAMC zajmodell mutatott -> unimodális
 - időskála: 0.001 s szimulációs neutronszám: 262144 mintaszám: 15 realizáció
 - modellezni kell a DMC-re jellemző egyedi fázisokat is (forráskonvergencia és prekursor generálás)
 - a módosított SALDC-PWR megoldás mutatja meg a releváns kezdeti állapotokat a DMC vizsgálatára („curve of interest”)



KÖSZÖNÖM SZÉPEN A FIGYELMET!

KÉRDÉSEK