

Nemlineáris anyagviselkedés peridynamikus modellezése

Ladányi Gábor, PhD hallgató

ladanyi@uniduna.hu

Témavezető: Dr. Gonda Viktor

Kutatási beszámoló

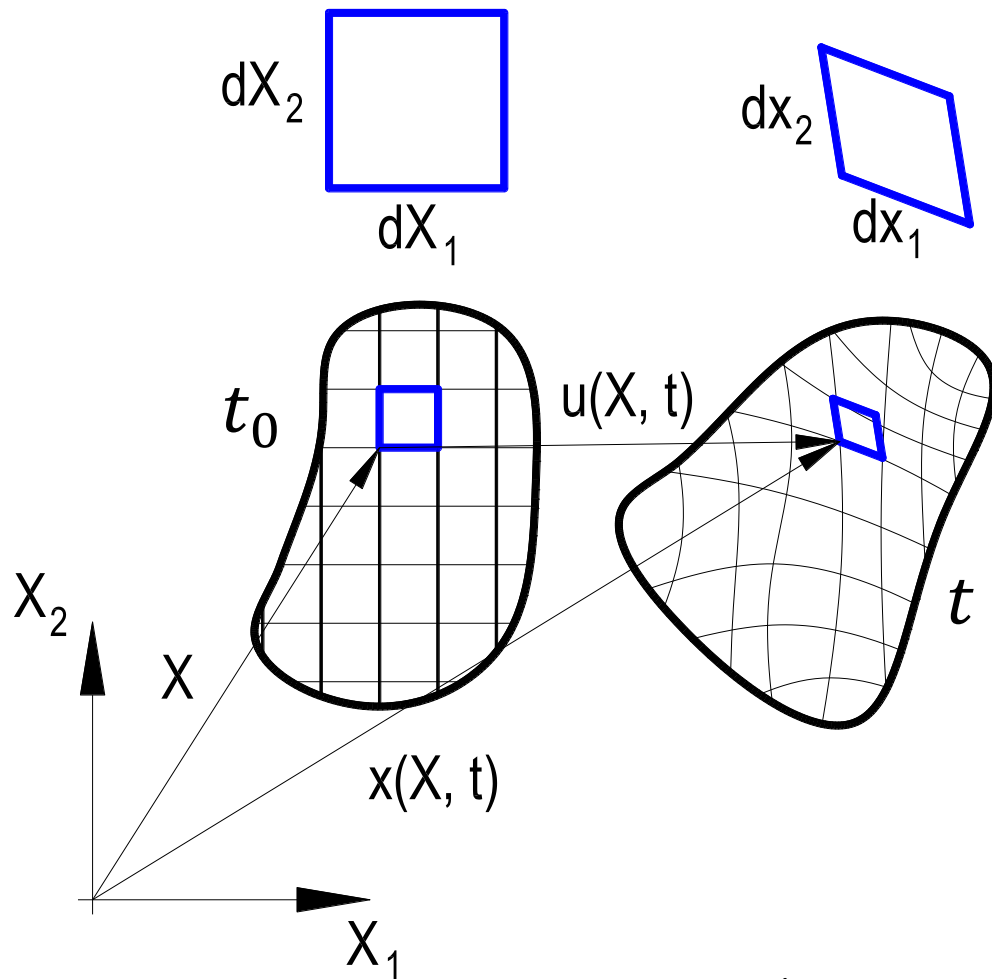
2018.06.22.

Tartalom

- Bevezetés
 - Motiváció
 - A peridinamikus anyagmodell
 - Irodalmi áttekintés
- Korábbi kutatási eredmények összefoglalása
- Célkitűzések
 - Nagy alakváltozások peridinamikus leírása
 - A peridinamikus megoldás „megbízhatóságának” javítása
- Eredmények és további tervek
 - Az eddigi eredmények publikálása
 - Nagy rugalmas, képlékeny modell kidolgozása
 - Az intenzív képlékeny alakítás peridinamikus modellezése



Az alakváltozási állapot



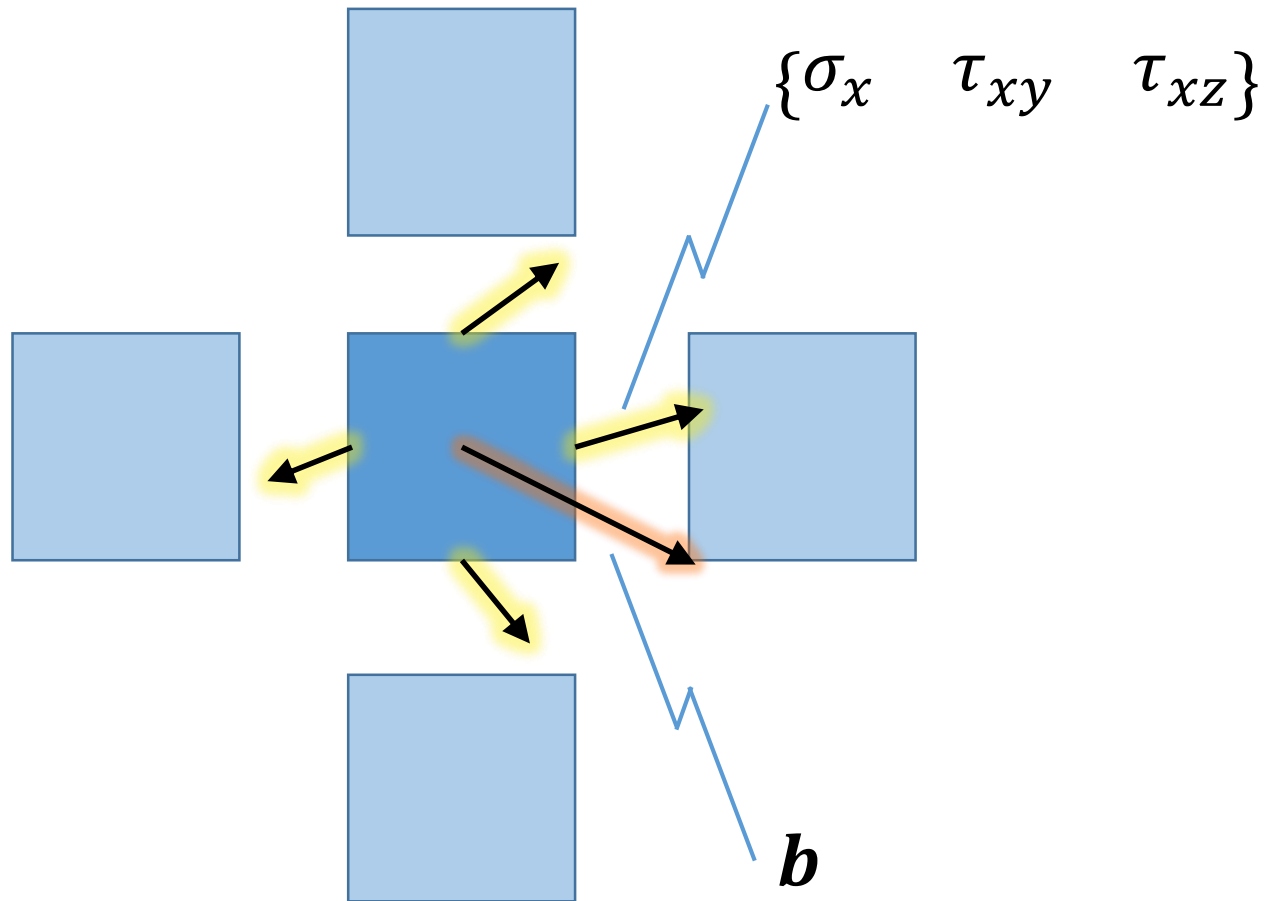
- Az $\mathbf{X} \in V_0$ pont környezetének alakváltozását az \mathbf{F} alakváltozási gradiens reprezentálja:

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} = \mathbf{I} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{X}}$$

- A merevtest szerű elmozdulás nem okozhat belső erőt, feszültséget!



A (klasszikus) lokális anyagmodell

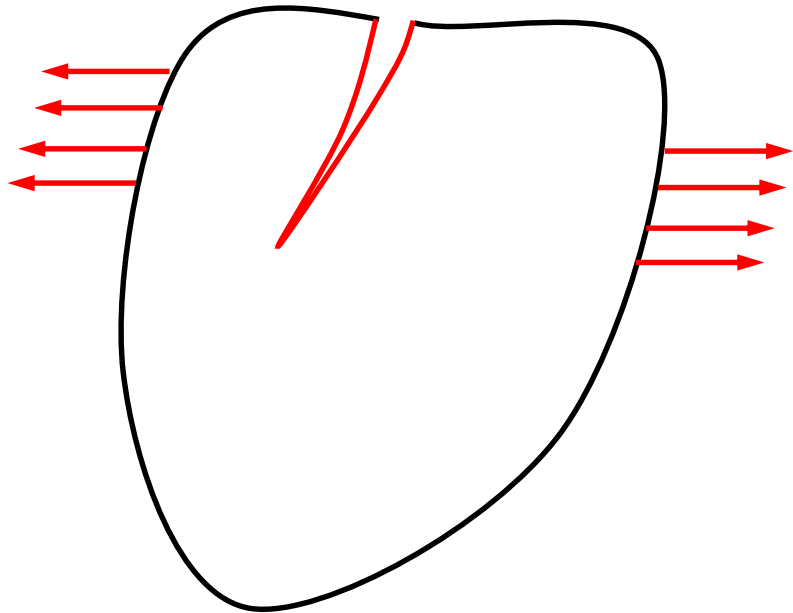


$$\rho \cdot \mathbf{a} = \text{Div}(\boldsymbol{\sigma}) + \mathbf{b}$$

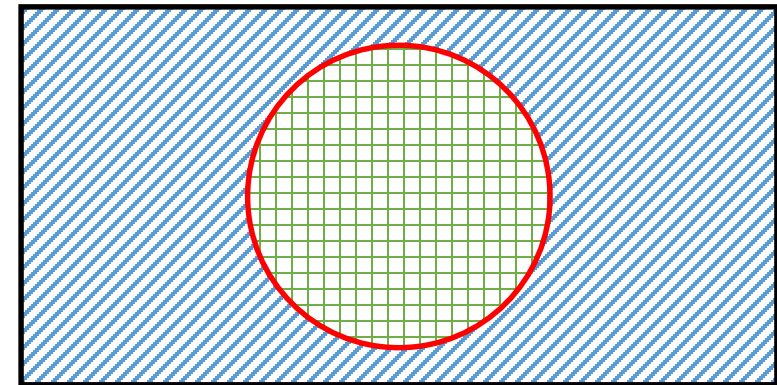
ρ : tömegűrűség,
 \mathbf{a} : gyorsulás,
 $\boldsymbol{\sigma}$: Cauchy-féle feszültségi tenzor,
 $= \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{F}, \dots)$
 \mathbf{b} : térfogati terhelés.



A klasszikus modell hiányosságai



Repedés: $[[\mathbf{u}]] \neq \mathbf{0}$



Érintkezési felület: $[[\mathit{Grad} \mathbf{u}]] \neq \mathbf{0}$

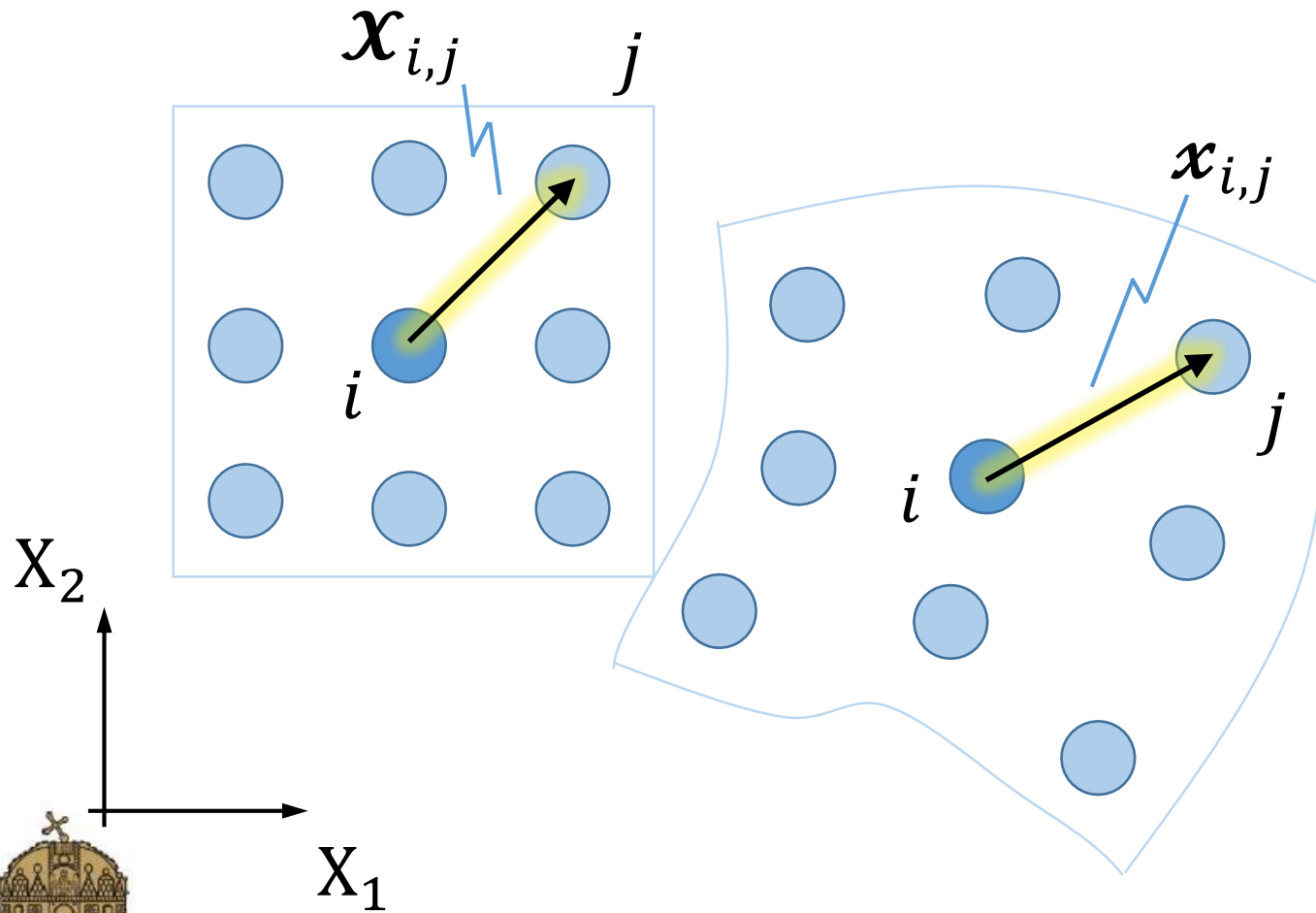
A repedéskeletkezés, terjedés és elágazás leírása további kinetikai vagy energetikai feltételt igényel.

Óbudai Egyetem

Anyagtudományi és Technológiai Doktori Iskola



A peridinamikus alakváltozási gradiens^[1]



- Az F alakváltozási gradiens:

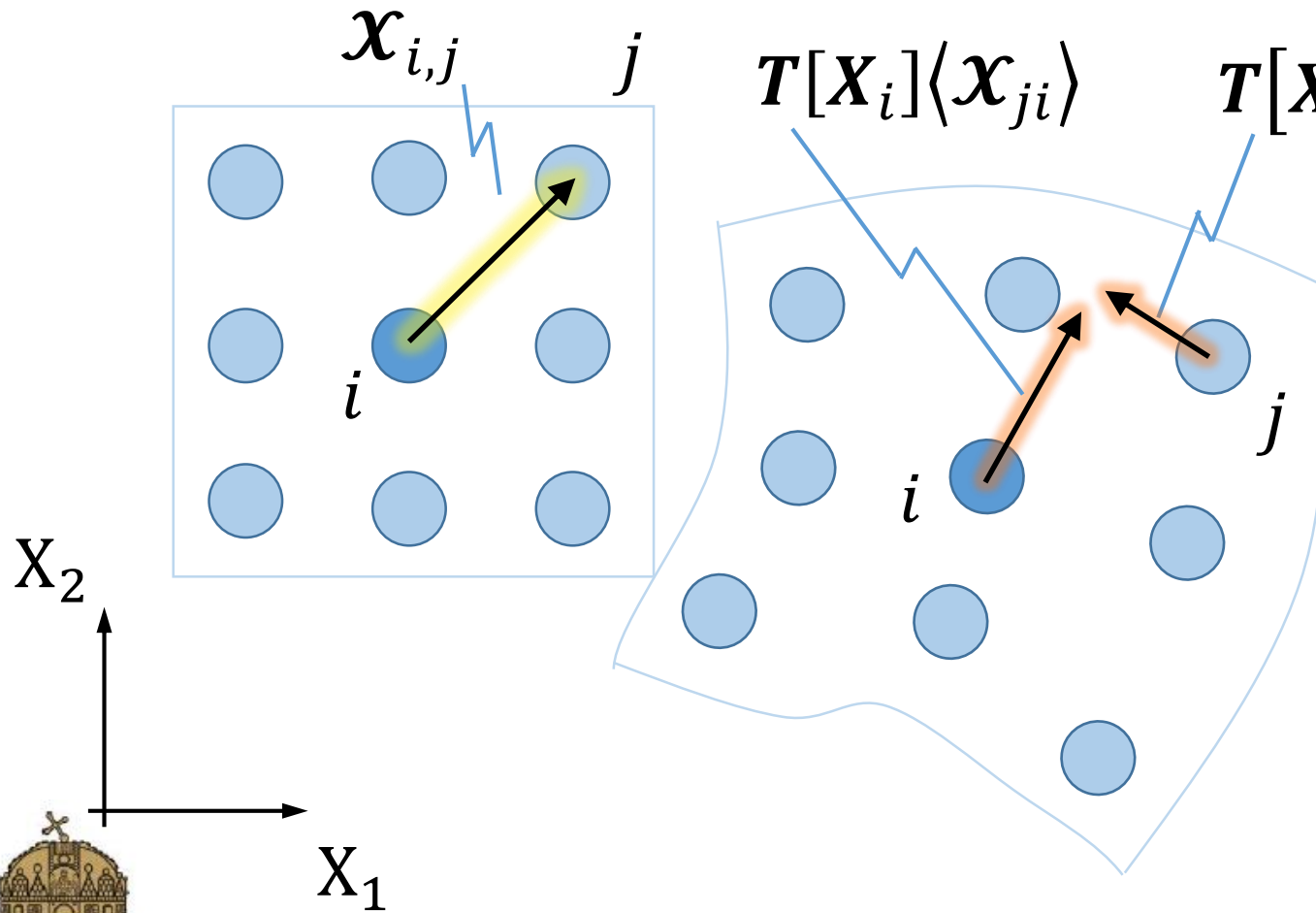
$$F(\mathbf{X}_i) \cong \mathbf{K}^{-1} \cdot \sum_{j=1}^{NF} \omega_{i,j} \cdot \mathbf{x}_{i,j} \otimes \mathbf{x}_{i,j}$$

ahol \mathbf{K} az alaktenzor:

$$\mathbf{K} = \sum_{j=1}^{NF} \omega_{i,j} \cdot \mathbf{x}_{i,j} \otimes \mathbf{x}_{i,j}$$



A peridinamikus erő-állapot^[6]



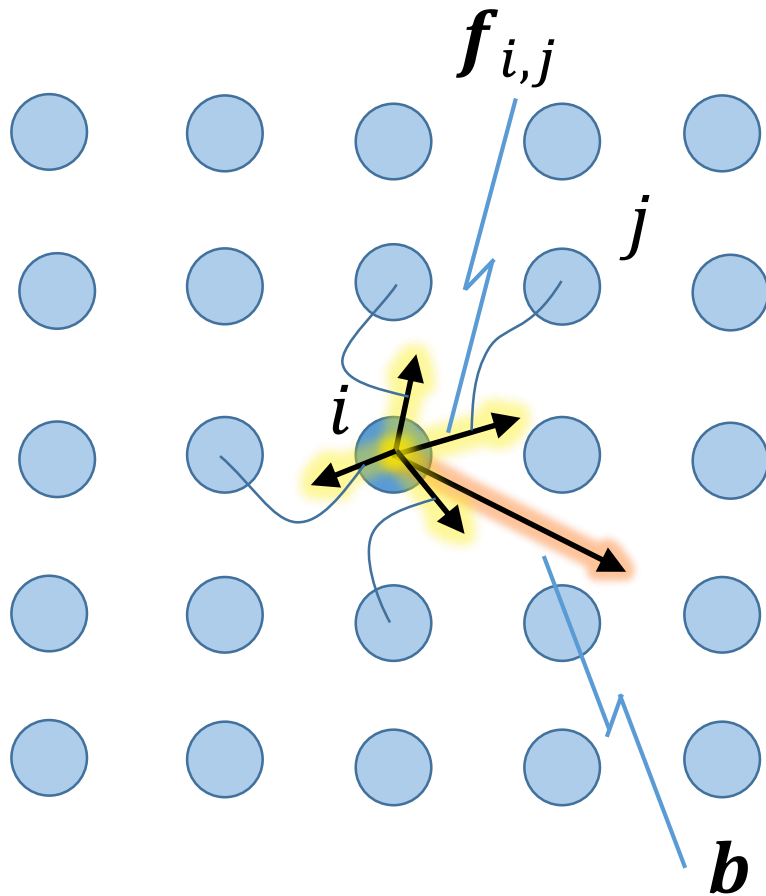
$$\rho \cdot \mathbf{a} = \sum_{i=1}^{NF} \mathbf{f}_{i,j} + \mathbf{b}$$

$$\mathbf{f}_{i,j} = \mathbf{T}[\mathbf{X}_j] \langle \mathbf{x}_{ij} \rangle - \mathbf{T}[\mathbf{X}_i] \langle \mathbf{x}_{ji} \rangle$$

$$\mathbf{T}[\mathbf{X}_i] \langle \mathbf{x}_{ij} \rangle = \omega_{i,j} \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{F}(\mathbf{X}_i)) \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{x}_{ij}$$



A peridinamikus mozgásegyenlet^[1]



$$\rho \cdot \mathbf{a} = \sum_{i=1}^{NF} \mathbf{f}_{i,j} + \mathbf{b}$$

ρ : tömegűrűség,

\mathbf{a} : gyorsulás,

$\mathbf{f}_{i,j}$: peridinamikus belső erő,

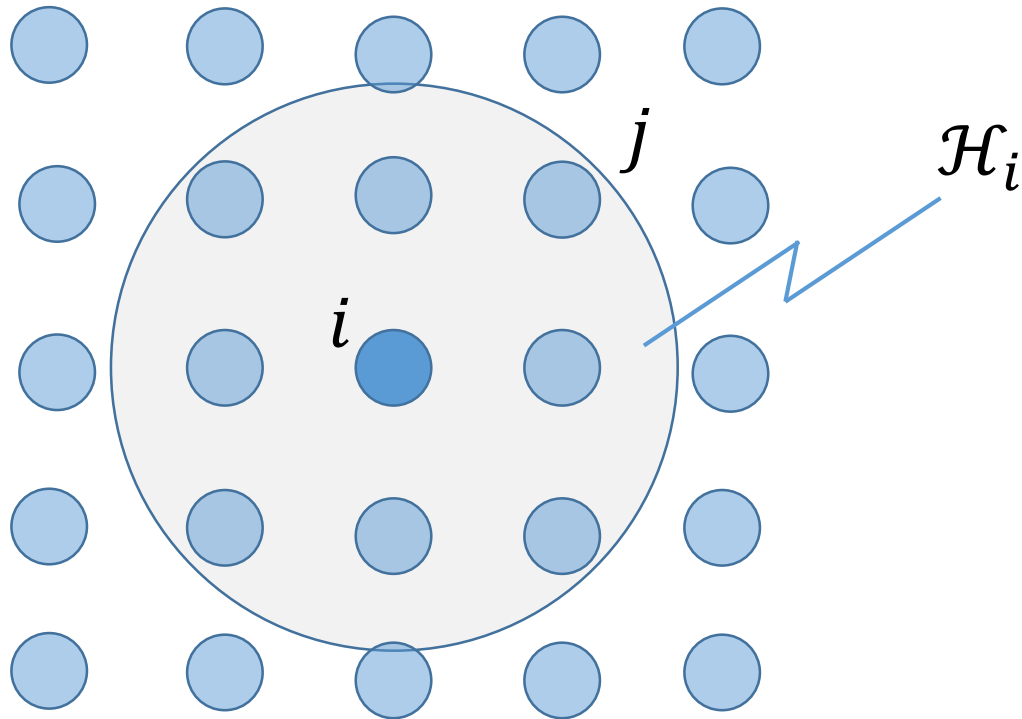
$$= \mathbf{f}[\mathbf{X}_i] \langle \mathbf{x}_{ij} \rangle$$

$$= \mathbf{f}(\mathbf{F}(\mathbf{X}_i), \dots)$$

\mathbf{b} : térfogati terhelés.



A peridinamikus mozgásegyenlet^[1]



$$\rho \cdot \mathbf{a} = \sum_{i=1}^{NF} \mathbf{f}_{i,j} + \mathbf{b}$$

ρ : tömegűrűség,

\mathbf{a} : gyorsulás,

$\mathbf{f}_{i,j}$: peridinamikus belső erő,

$$= \mathbf{f}[\mathbf{X}_i] \langle \mathbf{x}_{ij} \rangle$$

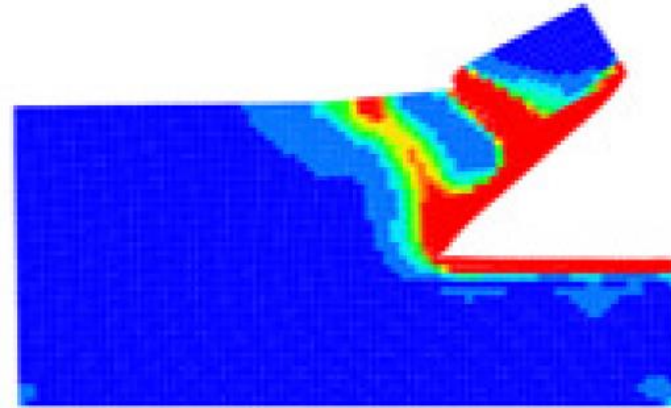
$$= \mathbf{f}(\mathbf{F}(\mathbf{X}_i), \dots)$$

\mathbf{b} : térfogati terhelés.

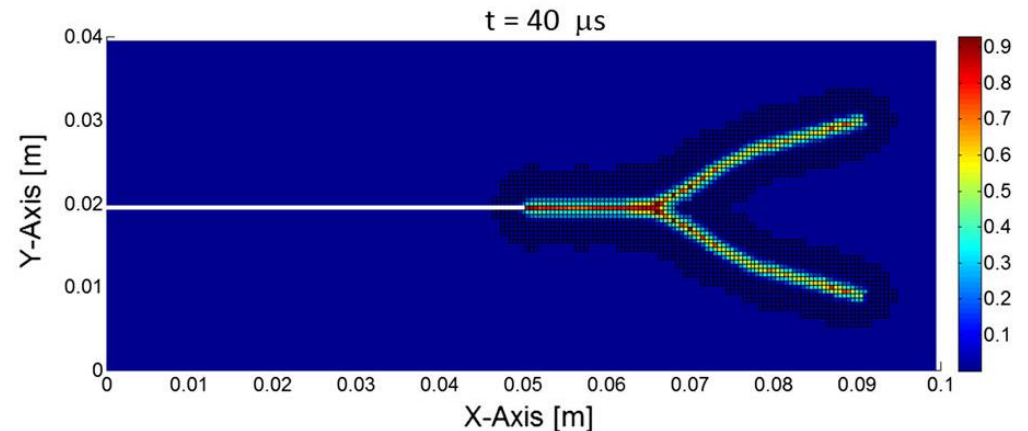


A peridinamikus modell alkalmazásai^[2, 3]

- *Rugalmas alakváltozás,*
- *Képlékeny alakváltozás,*
- *Viszkózus alakváltozás,*
- *Nanohálózat,*
- *Rideg törés,*
- *Termomechanika,*
- *Stb.*

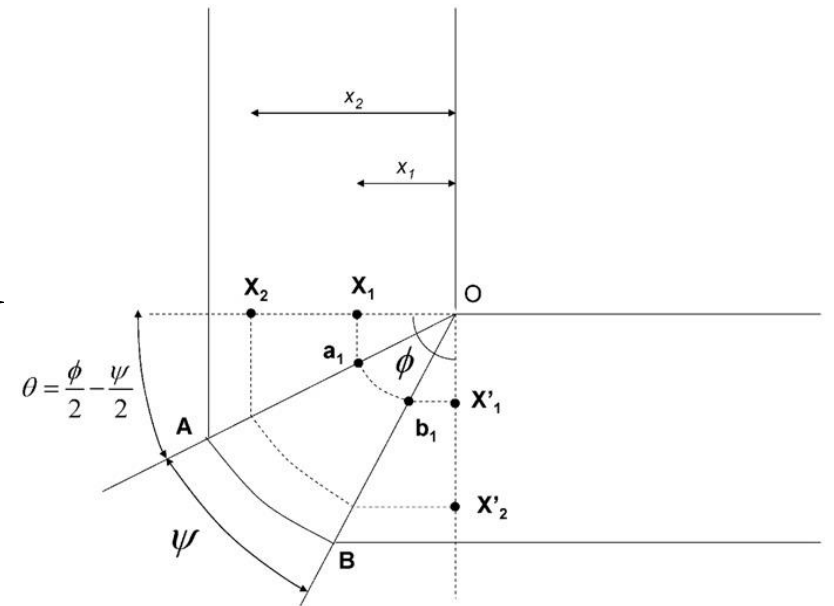
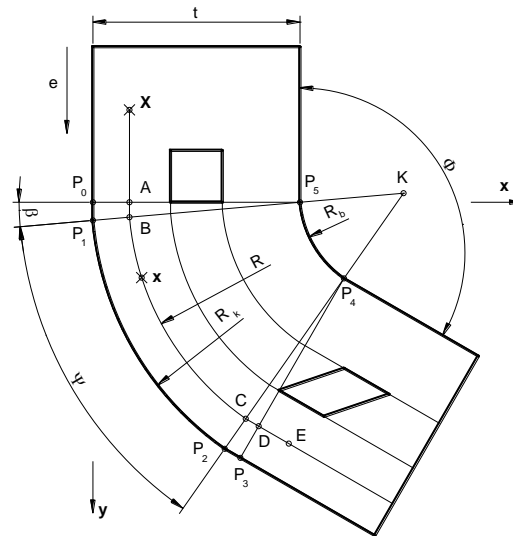


C.T. Wu, B. Ren, A stabilized non-ordinary state-based peridynamics for the nonlocal ductile material failure analysis in metal machining process, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* (2015),



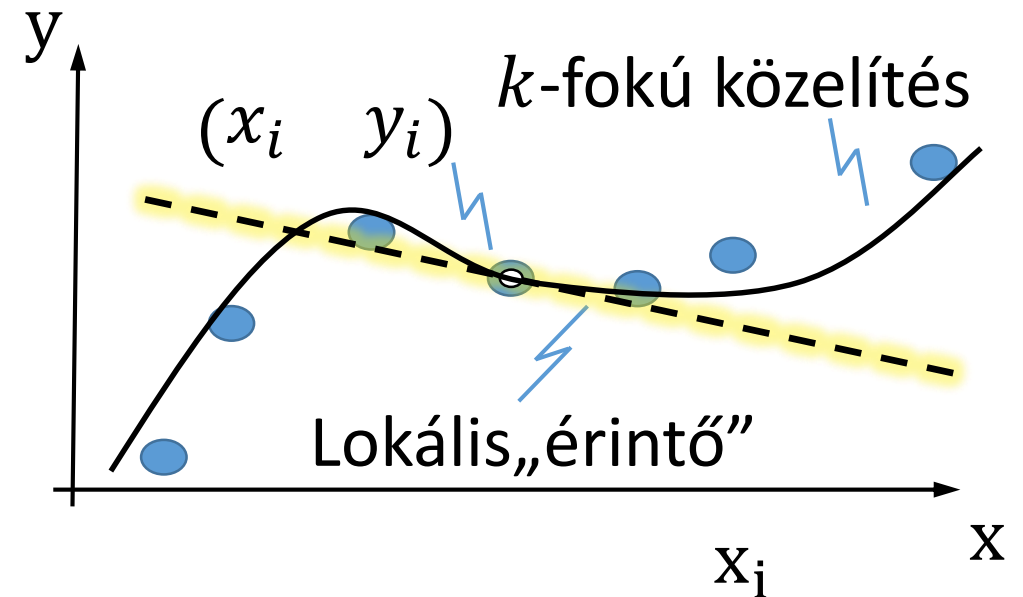
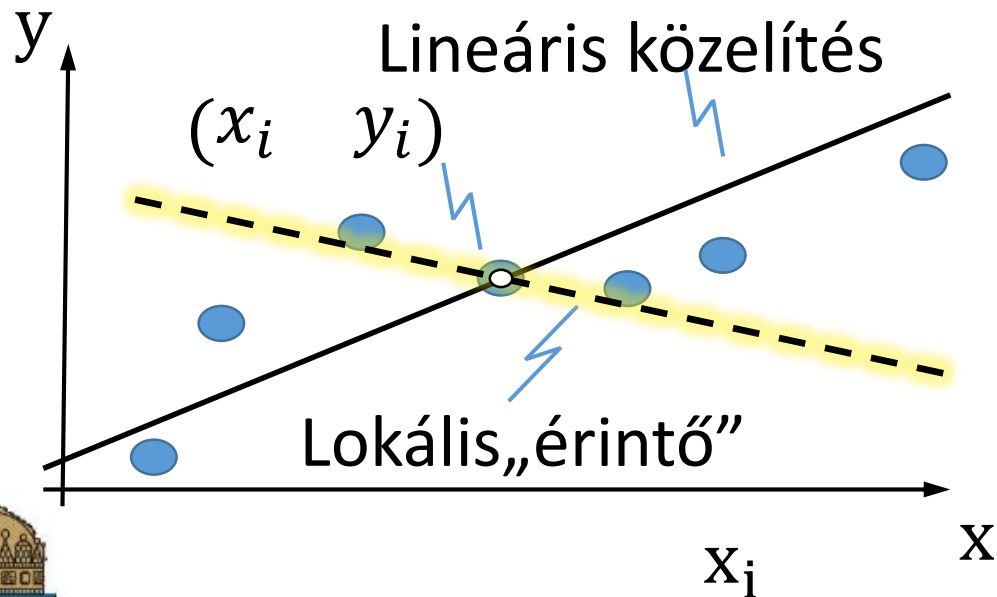
Célkitűzések

- Nemlineáris mechanika feladatok peridinamikus megfogalmazása
- Diszkretizált egyenletek megfogalmazása
- Hatékony megoldási módszer kidolgozása
 - Diszkretizálás
 - Merevségi mátrix előállítása
 - Lineáris megoldó
- Esettanulmányok vizsgálata
 - Egyszerű húzás
 - Hárompontos hajlítás
 - ...
 - Intenzív képlékeny alakítás



Az eddigi eredmények

- A peridinamikus differenciál operátor (PDO) és a lineáris legkisebb hibanégyzet közelítés kapcsolata. Az emelt fokszámú PDO.



Az eddigi eredmények

- A peridinamikus differenciál operátor (PDO) és a lineáris legkisebb hibanégyzet közelítés kapcsolata. Az emelt fokszámú PDO.
- „Klasszikus feladatok” peridinamikus megfogalmazása
 - Hővezetési probléma
 - Alakváltozási probléma
 - Kapcsolt hőrugalmas probléma

- Az erő-állapot:

$$\mathbf{T}_{ij} = \omega(|\mathbf{x}_{ij}|) \cdot \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{x}_{ij} \cdot \mathbf{K}_i^{-1}$$

- A mozgásegyenlet:

$$\varrho \cdot \ddot{\mathbf{u}}_i = \int_{\mathcal{H}_i} (\mathbf{T}_{ji} - \mathbf{T}_{ij}) d\mathbf{X}_j + \mathbf{b}_i$$

- A hőáram-állapot:

$$Q_{ij} = \omega(|\mathbf{x}_{ij}|) \cdot \mathbf{q}_i \cdot \mathbf{x}_{ij} \cdot \mathbf{K}_i^{-1}$$

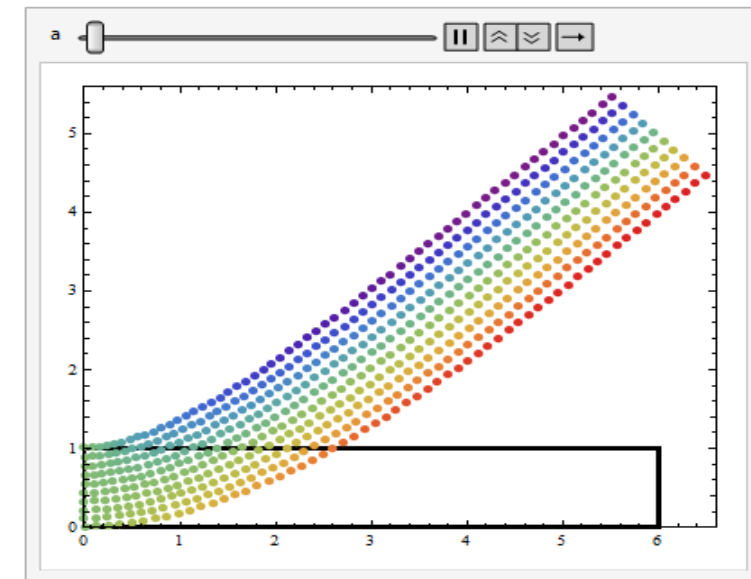
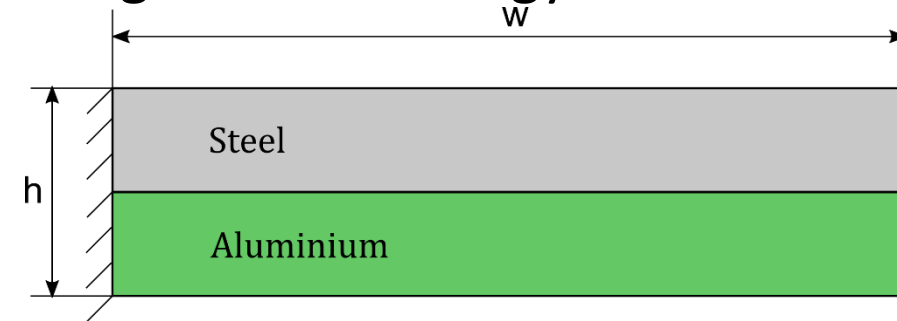
- A hővezetési egyenlet:

$$\varrho \cdot c_V \cdot \dot{\Theta}_i = \int_{\mathcal{H}_i} (Q_{ji} - Q_{ij}) d\mathbf{X}_j + \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_i \cdot \Theta_{i0} + h_i$$



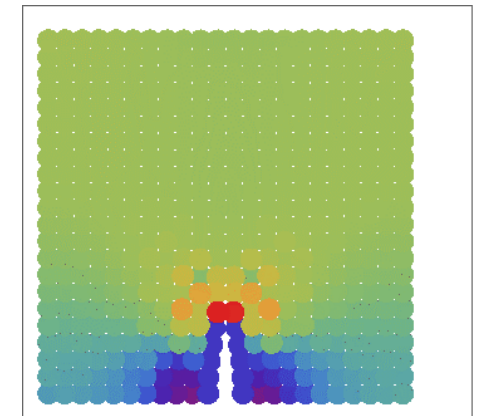
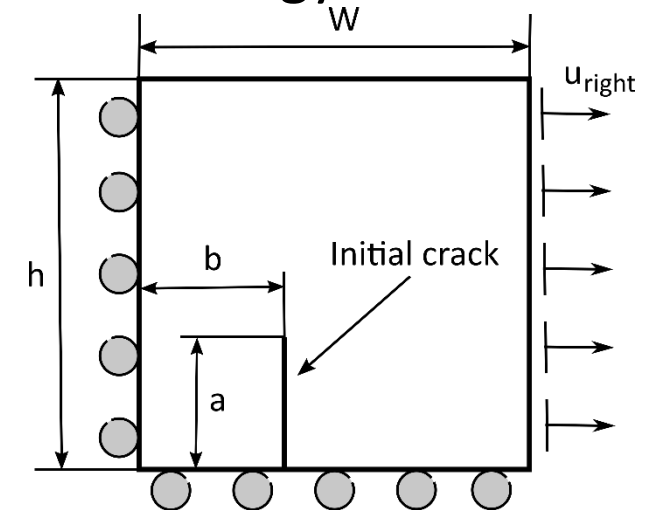
Az eddigi eredmények

- A peridinamikus differenciál operátor (PDO) és a lineáris legkisebb hibanégyzet közelítés kapcsolata. Az emelt fokszámú PDO.
- „Klasszikus feladatok” peridinamikus megfogalmazása
 - Hővezetési probléma
 - Alakváltozási probléma
 - Kapcsolt hőrugalmas probléma
- A diszkretizálás és a megoldás hatékonyságának javítása
 - Szomszédkeresés „naiv” helyett „k-d fa” algoritmussal,
 - Hagyományos helyett ADR és SVD lineáris megoldók alkalmazása.
 - Párhuzamos architektúrára (GPGPU) épülő megoldó fejlesztése.
- Az emelt fokszámú közelítés alkalmazása tesztfeladatokon
 - 1D problémák: állandósult hővezetés, hajlított gerenda, stb.
 - 2D problémák: állandósult hővezetés, síkfeszültségi problémák



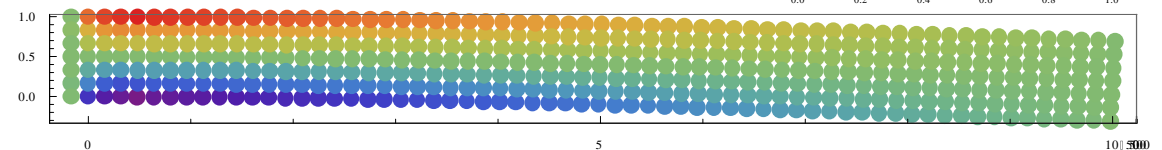
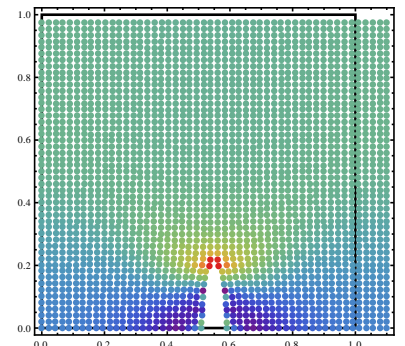
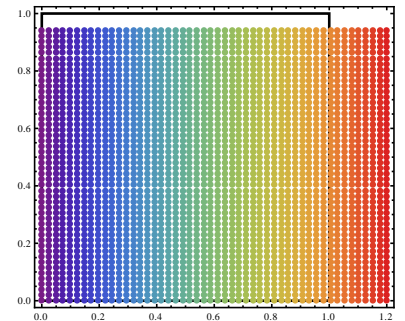
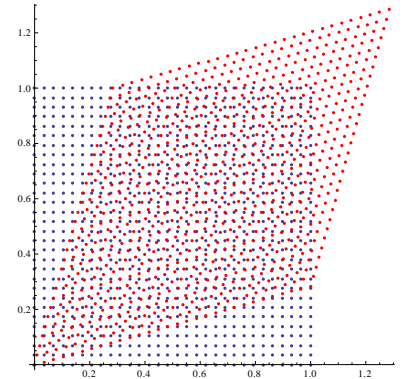
Az eddigi eredmények

- A peridinamikus differenciál operátor (PDO) és a lineáris legkisebb hibanégyzet közelítés kapcsolata. Az emelt fokszámú PDO.
- „Klasszikus feladatok” peridinamikus megfogalmazása
 - Hővezetési probléma
 - Alakváltozási probléma
 - Kapcsolt hőrugalmas probléma
- A diszkretizálás és a megoldás hatékonyságának javítása
 - Szomszédkeresés „naiv” helyett „k-d fa” algoritmussal,
 - Hagyományos helyett ADR és SVD lineáris megoldók alkalmazása.
 - Párhuzamos architektúrára (GPGPU) épülő megoldó fejlesztése.
- Az emelt fokszámú közelítés alkalmazása tesztfeladatokon
 - 1D problémák: állandósult hővezetés, hajlított gerenda, stb.
 - 2D problémák: állandósult hővezetés, síkfeszültségi problémák
 - 2D problémák: tranziens hőrugalmas viselkedés és repedésterjedés



A tervezett tevékenységek

- Publikáció:
 - Kapcsolt hőrugalmas probléma megoldása:
EuroSimE2018 – Toulouse – 2018.04.
Dunakavics folyóirat – 2018.07.
 - Hiperelasztikus probléma megoldása:
ESMC2018 – Bologna – 2018.07.
Journal of Peridynamic Modelling – 2018.10.
- Kutatás:
 - Képlékeny anyagmodellek adaptálása és alkalmazása
- Oktatás:
 - Statika,
 - Károsodás elmélet és szerk. integritás,
 - Stb.



Köszönöm megtisztelő
figyelmüket!

Ladányi Gábor, PhD hallgató

ladanyi@uniduna.hu

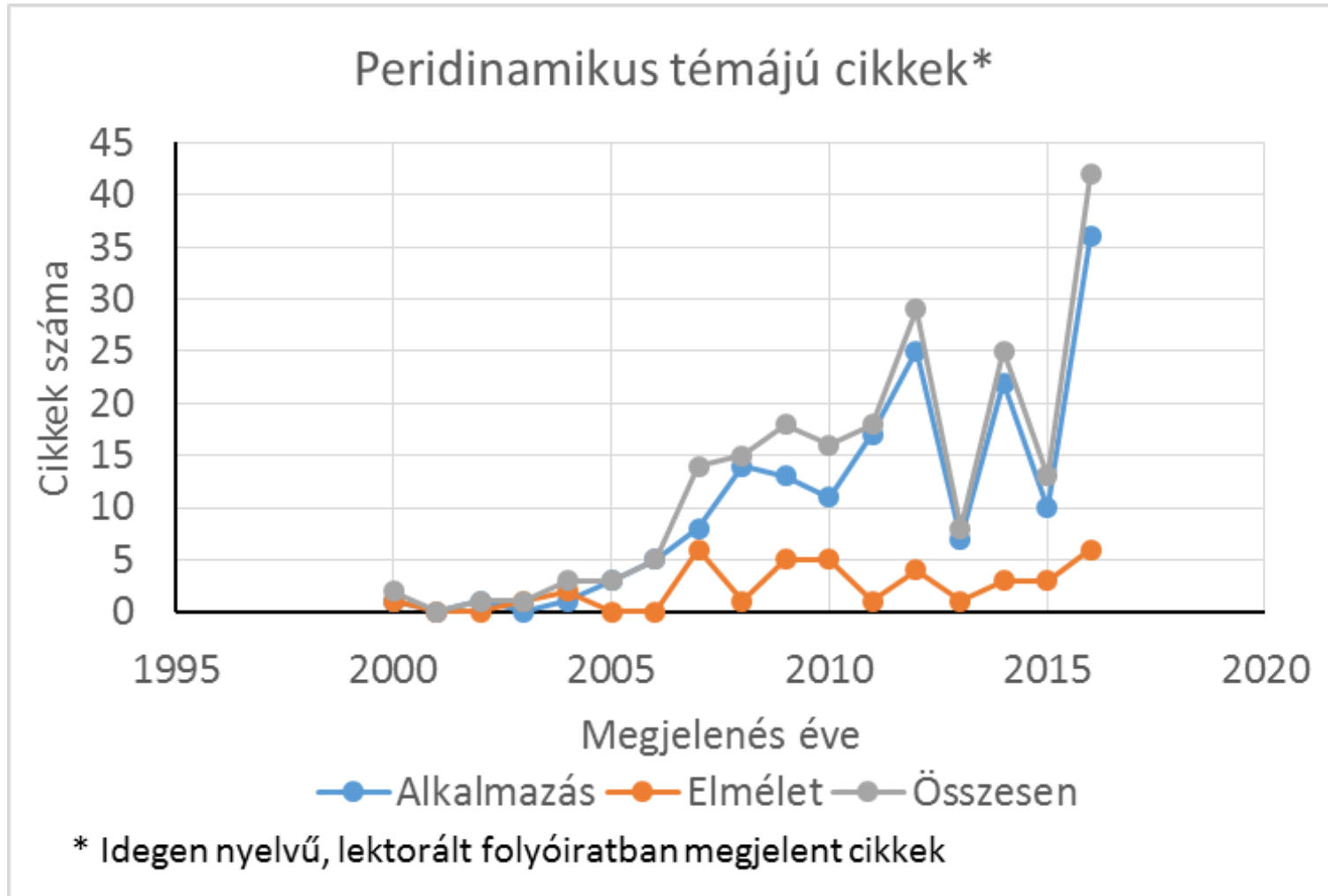
Függelék

Felhasznált irodalom

- [1] S. A. Silling , M. Epton, O. Weckner, J. Xu, E. Askari - Peridynamic States and Constitutive Modeling
J Elasticity (2007) 88: 151–184
- [2] C.T. Wu, B. Ren, A stabilized non-ordinary state-based peridynamics for the nonlocal ductile material failure ...
Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. (2015)
- [3] D. Dipasquale, M. Zaccariotto, U. Galvanetto, Crack propagation with adaptive grid refinement in 2D Peridynamics
Int J Fract (2014) 190: 1–22
- [4] M. A. BessaJ. T. FosterT. Belytschko, Wing Kam Liu - A meshfree unification: reproducing kernel peridynamics
Computational Mechanics (2014) 53: 1251–1264
- [5] G.C. Ganzenmüller, S. Hiermaier, M. May - On the similarity of meshless discretizations of Peridynamics and SPH
Computers and Structures (2015) 150: 71–78
- [6] M.S. Breitenfeld, P.H. Geubelle, O. Weckner, S.A. Silling - Non-ordinary state-based peridynamic analysis of stationary crack problems, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. (2014) 272: 233–250



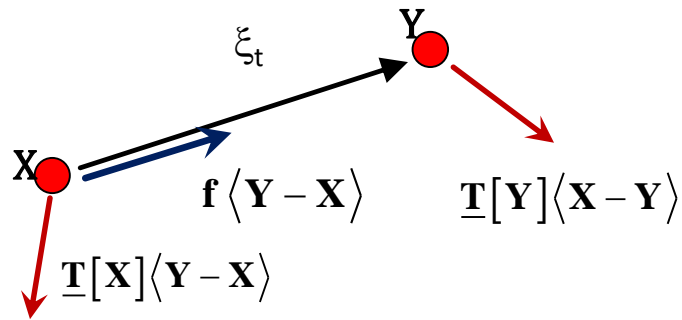
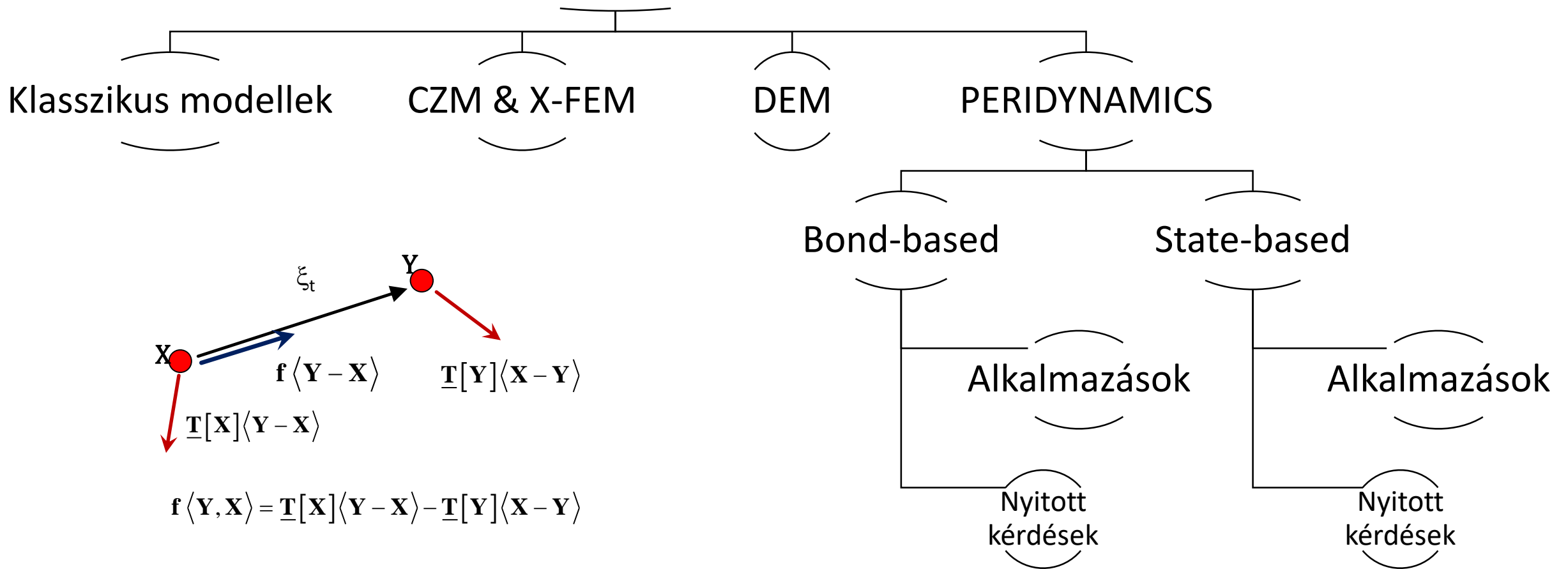
A peridynamikus anyagmodell eddigi eredményei



| TOPIC | Number of articles |
|----------------------------|--------------------|
| Books | 3 |
| Computational techniques | 3 |
| Coupling with FEM/MESHLESS | 20 |
| Damage | 6 |
| Fatigue | 7 |
| Fracture | 49 |
| Meshless | 6 |
| Nonlocal | 18 |
| Other appl. | 33 |
| Plasticity | 15 |
| State based | 17 |

A peridinamikus kutatási fa

Törésmechanika - repedésterjedés



$$\mathbf{f}\langle \mathbf{Y}, \mathbf{X} \rangle = \underline{\mathbf{T}}[\mathbf{X}]\langle \mathbf{Y} - \mathbf{X} \rangle - \underline{\mathbf{T}}[\mathbf{Y}]\langle \mathbf{X} - \mathbf{Y} \rangle$$

Köszönöm megtisztelő
figyelmüket!

Ladányi Gábor, PhD hallgató

ladanyi@uniduna.hu