

# DunaKavics

A Dunaújvárosi Egyetem online folyóirata 2021. IX. évfolyam IV. szám

Műszaki-, Informatikai és Társadalomtudományok

**SZABÓ ATTILA–BERECZKI PÉTER**  
Reaktorszerkezeti anyagok he-  
gesztett kötéseinek kisciklusú  
fárasztása



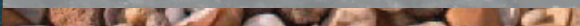
**SZABÓ PÉTER ET AL.**  
Roncsolásmentes vizsgálati  
módszerek fejlesztése



**KOVÁCS-BOKOR ÉVA–KISS ENDRE**  
Vízparti növények nehézfém-ak-  
kumulációjának meghatározása  
a dunai üledékekben



**LADÁNYI GÁBOR–GONDA VIKTOR**  
Nagy alakváltozású rugalmas prob-  
lémák magasabb rendű peridi-  
namikus modellezése



# Dunakavics

A Dunaújvárosi Egyetem online folyóirata 2021. IX. évfolyam IV. szám

Műszaki-, Informatikai és Társadalomtudományok

MEGJELENIK ÉVENTE 12 ALKALOMMAL

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

András István, Bacsa-Bán Anetta, Balázs László,  
Nagy Bálint, Németh István, Pázmán Judit, Rajcsányi-Molnár Mónika.

Felelős szerkesztő Németh István  
Tördelés Duma Attila

Szerkesztőség és a kiadó címe 2400 Dunaújváros, Táncsics M. u. 1/a.

Kiadja DUE Press, a Dunaújvárosi Egyetem kiadója  
Felelős kiadó Dr. habil András István, rektor



A lap megjelenését támogatta a Nemzeti Kulturális Alap

<http://dunakavics.due.hu>

ISSN 2064-5007

# Tartalom

SZABÓ ATTILA-BERECZKI PÉTER

***Reaktorszerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek  
kisciklusú fárasztása***

5

SZABÓ PÉTER-FEHÉR JÁNOSNÉ-SZABÓ SZEBAZTIÁN-MOLNÁR JÁNOS-  
KOCÓS ENDRE-PÁGER BÉLA-AGÓCS MIHÁLY-CSINCSI ZSUZSANNA-  
SZIKSZAI KRISTÓF-PÁMER ÁDÁM-BAKI ROLAND

***Roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése***

31

KOVÁCS-BOKOR ÉVA-KISS ENDRE

***Vízparti növények nehézfém-akkumulációjának meghatározása  
a dunai üledékekben***

57

LADÁNYI GÁBOR-GONDA VIKTOR

***Nagy alakváltozású rugalmas problémák magasabb rendű  
peridinamikus modellezése***

75

***Galéria***

(Sóti István fotói)

101



## *Reaktorszerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek kisciklusú fárasztása*

**Összefoglalás:** A nyomottvizes reaktorok reaktortartálya az atomerőmű biztonságos üzemeltetése szempontjából kiemelt fontosságú berendezés. Nagy nyomáson (12–15 MPa) és nagy hőmérsékleten (250–325 °C) üzemel és magába foglalja a reaktor aktív zónáját. A tartály és a hozzá kapcsolódó nyomástartó berendezések szerkezeti integritásának biztosítása elsődleges fontosságú az erőmű teljes üzemideje alatt, mivel ezek épsége szavatolja azt, hogy radioaktív közeg nem kerül ellenőrizetlenül a technológiai rendszeren kívülre, és nem veszélyezteti az erőmű dolgozóit, a lakosságot és a környezetet. Emiatt a reaktortartálynak a reaktor normál üzemállapotaiból és a lehetséges üzemzavari állapotokból eredő valamennyi terhelést el kell tudnia viselni, sérülés nélkül. Annak ellenére, hogy léteznek elemzések, melyek a reaktortartály cseréjének műszaki megoldhatóságát igazolják, az élettartam-gazdálkodás szemszögéből nézve nem cserélhető berendezésnek tekintik. A fentiek szerint a reaktortartály az atomerőmű azon berendezése, amelyek az üzemeltetési élettartam kereteit kijelöli.

Az atomerőmű berendezései nagyszámú hegesztési varratot, illetve hegesztéssel készült korrózióvédő plattírozást tartalmaznak, ezért az alapfém tulajdonságainak megismerésén túl legalább ugyanilyen fontos az alapfém általában alakított szerkezetétől jelentősen különböző, öntött struktúrájú hegesztett kötések fáradási viselkedésének ismerete.

Az energiaiparban még a statikus üzeműnek tekintett szerkezetek igénybevétele is nagymértékben változik indításkor és leálláskor, fűtéskor és hűtéskor, meleg vagy hideg közeg betáplálásakor. Ezek a járulékos feszültségek sokszor jóval nagyobbak a tervezett üzemi feszültségeknél és gyakran okoznak kisciklusú fáradást. A szakirodalomban található legtöbb kutatás atomerőműi berendezések körében állandó hőmérsékleten végzett fáradásra irányult. Ezekben a berendezésekben az indítások és leállások, valamint az üzem közben fellépő hőmérsékletingadozások miatt nem csak a belső nyo-

\* *Dunaiújvárosi Egyetem,  
Műszaki Intézet*  
E-mail: szaboattila@uniduna.hu

\*\* *Dunaiújvárosi Egyetem,  
Műszaki Intézet*  
E-mail: bereczkip@uniduna.hu

másból származó feszültségek, hanem a hőmérséklet-gradiensek következtében fellépő hőfeszültségek is jelentős intenzitást érhetnek el, továbbá a szerkezeti anyag hőfizikai tulajdonságai is jelentősen változnak hőmérsékletváltozás hatására. Az irodalomból megismerhető állandó hőmérsékleten végzett kisciklusú fárasztóvizsgálat során ezeket a hatásokat figyelmen kívül hagyták. Kutatómunkánkban a valós üzemi körülményeket jobban közelítő termomechanikai fárasztóvizsgálatokkal lehetőség nyílik a mechanikai ciklusokkal párhuzamosan hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető, ezáltal a reaktortartály és hegesztett kötéseinek várható élettartama pontosabban közelíthető.

**Kulcsszavak:** Reaktortartály; hegesztési varrat; statikus üzem; fárasztóvizsgálat.

**Abstract:** The reactor vessel of Pressurized Water Reactors is a key equipment for the safe operation of a nuclear power plant. It operates at high pressure (12–15 MPa) and high temperature (250–325 °C) and includes the reactor core. Ensuring the structural integrity of the tank and associated pressure equipment and its welded joints is paramount throughout the life of the plant, as their integrity ensures that radioactive media do not escape uncontrolled outside the process and do not endanger plant workers, the public and the environment. Therefore, the reactor vessel must be able to withstand all loads resulting from the normal operating conditions of the reactor and possible malfunctions without damage. Although there are analyzes that demonstrate the technical feasibility of replacing the reactor vessel, it is considered a non-replaceable equipment from a management perspective. As mentioned above, the reactor vessel is the equipment of the nuclear power plant that designates the framework of the operating life.

The equipment of a nuclear power plant includes a large number of welds and corrosion protection cladding made by welding, so in addition to understanding the properties of the base metal, it is at least as important to know the fatigue behavior of welded joints with significantly different structure than the base metal. In the energy industry, even the use of structures considered to be static varies greatly during start-up and shut-down, heating and cooling, and feeding hot or cold media. These additional mechanical stresses are often much higher than the design operating stress and often cause short-cycle fatigue.

Most of the research in the literature has focused on fatigue at constant temperatures among nuclear power plant equipment. In these devices, not only stresses from internal pressure but also thermal stresses due to temperature gradients can reach significant intensities due to starts and stops and temperature fluctuations during operation, and the thermophysical properties of the structural material change significantly with temperature change. In a low-temperature fatigue test at constant temperature known from the literature, these effects were ignored. In our research, thermomechanical fatigue tests that better approximate real operating conditions make it possible to operate temperature cycles on the specimen in parallel

with the mechanical cycles, so the actual load of the equipment can be more accurately modeled, thus the life expectancy of the reactor vessel and welded joints can be approximated more accurately.

**Keywords:** Reactor vessel; welding seam; static plant; fatigue test.

## Bevezető

A nyomottvizes reaktorok reaktortartálya az atomerőmű biztonságos üzemeltetése szempontjából kiemelt fontosságú berendezés. Nagy nyomáson (12–15 MPa) és nagy hőmérsékleten (250–325 °C) üzemel és magába foglalja a reaktor aktív zónáját. A tartály és a hozzá kapcsolódó nyomástartó berendezések szerkezeti integritásának biztosítása elsődleges fontosságú az erőmű teljes üzemideje alatt, mivel ezek épsége szavatolja azt, hogy radioaktív közeg nem kerül ellenőrizetlenül a technológiai rendszeren kívülre, és nem veszélyezteti az erőmű dolgozóit, a lakosságot és a környezetet. Emiatt reaktortartálynak a reaktor normál üzemállapotaiból és a lehetséges üzemzavari állapotokból eredő valamennyi terhelést el kell tudnia viselni, sérülés nélkül. Annak ellenére, hogy léteznek elemzések, melyek a reaktortartály cseréjének műszaki megoldhatóságát igazolják, az élettartam-gazdálkodás szemszögéből nézve nem cserélhető berendezésnek tekintik. A fentiek szerint a reaktortartály az atomerőmű azon berendezése, amelyik az üzemeltetési élettartam kereteit kijelöli.

### A REAKTORTARTÁLY FELÉPÍTÉSE

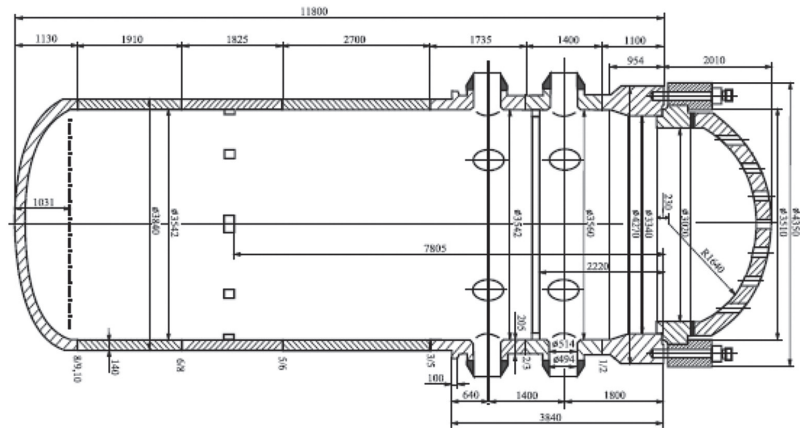
A paksi atomerőmű négy, könnyűvíz hűtésű, könnyűvíz-moderálású, nyomottvizes reaktorblokkból áll. A reaktortartályok típusa VVER-440/V-213Cs/1. A tartályokat a Škoda Gépgyár gyártotta, Plzenben, az egykori Csehszlovákiában. A reaktortartály egy álló hengeres nyomástartó edény, elliptikus fenékkal és karimás kötéssel csatlakozó fedéllel. A tartály hét részből áll: perem, két csonkzóna gyűrű (felső és alsó), két zóna körüli gyűrű (felső és alsó), támasztógyűrű és elliptikus fenék. E részeket hat körvarrattal hegesztették egymáshoz, fedettívű hegesztési eljárással. A tartály hosszmeteszete az *1. ábrán* látható. Valamennyi gyűrű Cr-Mo-V ötvöztetésű, ferrites szerkezetű (térben középpontos szabályos rácsú) acélból készült, amelyet kovácsolást követően a kiváló keményedés állapotára hőkezelnek. Ez az anyagszerkezeti állapot a tartós mechanikai és hőigénybevétel szempontjából stabil. Ugyanilyen acélból készült lemezt használtak fel az elliptikus fenék sajtolásához. A reaktortartályok belső falát titánnal stabilizált króm-nikkel ötvöztetésű korrózióálló plattírozással látták el. A csonkzóna gyűrűin hat meleg- és hat hidegági csonk található, ezekhez csatlakoznak átmeneti hegesztési varrattal az 500 mm átmérőjű, 70 mm falvastagságú csonktoldatok,

[1] Timofejev, B. T.–  
Karzov G. P. (2006):  
Assessment of the  
WWER-440/V-213  
reactor condition.  
*International Journal  
of Pressure Vessels and  
Piping*. 83. P. 216.

[2] Fekete B. (2016):  
*VVER-440 reaktor  
szerkezeti anyagok  
kisciklusú termo-  
mechanikai fáradása*.  
Doktori Értekezés,  
Budapesti Műszaki és  
Gazdaságtudományi  
Egyetem, Műszaki  
Mechanika Tanszék.

majd azokhoz a korrózióálló acélból készült 32 mm falvastagságú főkeringtető ve-  
zetékek. Timofejev cikke további részletes információkat tartalmaz a tartály gyártás-  
technológiájáról. [1] A reaktortartály fő műszaki adatait az 1. táblázat tartalmazza.

**1. ábra. A Paksi Atomerőműben is alkalmazott VVER-440/V-213Cs típusú reaktortartály keresztmetszeti képe**



Nemzetközi kutatások igazolják, hogy az atomerőművek hosszú távú biztonságos  
üzemeltetése biztosításához nincs elegendő ismeretünk az ismétlődő hőmérséklet-  
változások által kiváltott kisciklusú fáradás területén. Különösen igaz ez a VVER  
típusú atomerőművek szerkezeti anyagaira (ilyen a paksi atomerőmű is, lásd 1. ábra).  
Adatok hiányában általában USA szabályozási dokumentumok adatait használják,  
ami sok esetben konzervatív eredményt szolgáltat.

Ezért indokolt olyan kisciklusú fárasztóvizsgálatok elvégzése, amelyek az atom-  
erőmű-biztonság szempontjából legkritikusabb berendezéseinek (pl. reaktortartály)  
üzemi körülményeit közelítik a termomechanikai igénybevételek fizikai modellezé-  
sével. [2]



### 1. táblázat. A reaktortartály tervezési adatai [3]

Termikus teljesítmény (MWt)	1375
Villamos teljesítmény (MWe)	440
Hurkok száma	6
Fűtőelemek száma	312 (hexagonális)
Szabályozórúdák száma	37
Külső átmérő (mm)	3840
Falvastagság (mm)	140
Plattírozás vastagsága (mm)	9
Zóna átmérője (mm)	3010
Zóna aktív hossza (mm)	2420
Üzemanyag tömege (t)	44
Hűtőközegáram (m <sup>3</sup> /h)	45000
Kilépő hőmérséklet (°C)	297
Kilépő/belépő hőmérséklet különbsége (°C)	30
Üzemi nyomás (MPa)	12,26
Tervezési nyomás (MPa)	13,7
Próbanyomás (MPa)	19,12
Gyorsneutron-fluxus (n/cm <sup>2</sup> s)	1,5x10 <sup>11</sup> (E>0,5 MeV)
Tervezett üzemidő (év)	40
EOL fluencia (n/cm <sup>2</sup> )	2,6x10 <sup>20</sup> (E>0,5 MeV)

### A KISCIKLUSÚ FÁRADÁS

A legtöbb gépészeti szerkezetünket úgy méretezzük, hogy annak anyagában a folyáshatár biztonsági tényezővel csökkentett értékénél nagyobb igénybevétel ne jöhessen létre. Ennek ellenére elkerülhetetlen olyan lokális feszültséggyűjtő helyek kialakulása, melyekben az előre nem ismert járulékos terhelések hatására bizonyos mértékű képlékeny alakváltozás lép fel. Ilyen helyek lehetnek például a hirtelen létrejött keresztmetszet-változások, hegesztési varratok környezete, furatok, vagy a berendezés olyan részei, melyben bizonyos időtartamra olyan inhomogén hőmérsékletmező alakul ki, amely jelentős feszültséget okoz a szerkezet anyagában, és amellyel a méretezésnél nem számoltunk. Ha a kritikus helyeken a képlékeny alakváltozás csak egyszer jön létre, akkor annak mértékétől függően a feszültségmező átrendeződésével és a kritikus hely környezetében lévő nagyfeszültség-gradiens leépülésével az anyag teherbíró képessége növekedhet a képlékeny keményedés által [4]. Ha ezek a méretezés során elhanyagolt folyáshatár feletti igénybevételek többször megisméltődnek, az anyag mikroszerkezete az ismétlődő képlékeny alakváltozás hatására megváltozik, benne repedések keletkezhetnek. Ez a folyamat végül a szerkezeti integritás megszűnéséhez, azaz repedés terjedéshez, majd töréshez vezet. A fent leírt jelenséget nevezi a szakirodalom kisciklusú fáradásnak. [2]

[3] Trampus, P. A. (2013): Reaktortartály üzemi kérdései. In: Csom Gyula (Szerk.): *Atomerőművek üzemtana II.4: Az energetikai atomreaktorok üzemtana*. Budapest: Pauker Holding.

[4] Lee, Y. L.–Pan, J.–Hathaway, R.–Barkey, M. (2005): *Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice*. Elsevier Butterworth–Heinemann. USA, MA.

[4] Lee, Y. L.–Pan, J.–Hathaway, R.–Barkey, M. (2005): *Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice. Elsevier Butterworth–Heinemann.* USA, MA.

[5] Coffin, L. F. (1974): *Fatigue at high temperature – Prediction and interpretation. Proc. Instn. Mech. Engrs.* 188. 9/74.

[6] Murakami, Y.–Miller, K. J. (2005): What is fatigue damage? A view point from the observation of low cycle fatigue process. *International Journal of Fatigue.* Vol. 27. P. 991.

[7] Maurel, V.–Rémy, L.–Dahmen, F.–Haddar, N. (2009): An engineering model for low cycle fatigue life based on a partition of energy and micro-crack growth. *International Journal of Fatigue.* Vol. 31. P. 952.

[8] Nagy Gy. (1999): *Anyagok károsodása és vizsgálata különböző üzemi körülmények között. Kisciklusú fárasztás.* Miskolci Egyetem, TEM-PUS S\_JEP\_11271 projekt támogatásával készült jegyzet, Miskolc.

Fontos megemlíteni, hogy a kisciklusú és a nagyciklusú fáradás tönkremeneteli ciklusszáma között általánosan nem húzódik éles határvonal és a kétféle károsodási mód valódi fizikai tartalmát nem az elnevezésükben kell keresni. Míg a nagyciklusú fáradás főként arányossági határon belüli feszültség szinten jelentkezik, addig kisciklusú fáradásról csak akkor beszélhetünk, ha az anyagban – ciklusonként – jelentős mértékű képlékeny alakváltozás is fellép. Coffin bevezette az átmeneti kifáradási élettartam fogalmát [5]. Ez alatt az adott anyagminőség fárasztóvizsgálata során mért ciklusszámot érti, amely egyenlő mértékű rugalmas és képlékeny alakváltozás mellett okoz tönkremenetelt. A kisciklusú fáradás során keletkező jelentős képlékeny alakváltozások miatt, már a kifáradás korai szakaszában – feszültség szinttől függően akár az első pár ciklusban – keletkeznek mikrorepedések, így a kisciklusú fáradás során a repedésterjedés a meghatározó károsodási folyamat. [6], [7]

Az energiaiparban még a statikus üzeműnek tekintett szerkezetek igénybevétele is nagymértékben változik indításkor és leálláskor, fűtéskor és hűtéskor, meleg vagy hideg közeg betáplálásakor. Ezek a járulékos feszültségek sokszor jóval nagyobbak a tervezett üzemi feszültségeknél és gyakran okoznak kisciklusú fáradást.

Az energetikai berendezéseknél a kisciklusú fáradás előfordulása az alábbiak szerint összegezhető [8]:

- Indításkor, leálláskor fellépő nyomás- és hőmérsékletváltozások okozta igénybevétel.
- Hideg vagy meleg közeg gyors betáplálása okozta hőfeszültség.
- Rezgésből származó feszültségek.

Kapcsolódó alkatrészek különböző hőtágulási együtthatói okozta hőfeszültségek (pl. plattírozott nyomástartó edények, armatúrák).

A kisciklusú fáradás során a feszültség és az alakváltozás közötti kapcsolat erősen nemlineáris, nagy alakváltozások jönnek létre, ezért a feszültség állandóértéken-tartása sok körülményt és bonyolult vizsgálattechnikát igényelne. Emiatt a kisciklusú fáradás vizsgálatát állandó alakváltozás-amplitúdó mellett végzik, mely során az egyes ciklusokban, a feszültség értéke változik – növekszik vagy csökken –, annak megfelelően, hogy a vizsgálati anyag keményedik vagy lágyul az ismételt igénybevétel hatására [4]. További fontos vizsgálattechnikai kérdés a hőmérséklet és a mechanikai terhelések kapcsolata.

A szakirodalomban található legtöbb kutatás az atomerőműi berendezések körében állandó hőmérsékleten végzett fáradásra irányult.

Ezekben a berendezésekben az indítások és leállítások, valamint az üzem közben fellépő hőmérsékletingadozások miatt, nem csak a belső nyomásból származó feszültségek, hanem a hőmérséklet-tranziensek következtében fellépő hőfeszültségek is jelentős intenzitást érhetnek el, továbbá a szerkezeti anyag hőfizikai tulajdonságai is jelentősen változnak hőmérsékletváltozás hatására. Az állandó hőmérsékleten végzett kisciklusú fárasztóvizsgálat során ezeket a hatásokat figyelmen kívül hagyjuk.

A valós üzemi körülményeket jobban közelítő termomechanikai fárasztóvizsgálatokkal lehetőség nyílik a mechanikai ciklusokkal párhuzamosan hőmérsékleti ciklusokat működtetni a próbatestre, így a berendezés tényleges terhelése pontosabban modellezhető. Ez történhet olyan ütemben, hogy a hőterhelés és a mechanikai terhelés „fázisban” van (IP – In Phase Test), vagy a hőmérséklet- és a nyúlás-amplitúdó a ciklus során ellentétes előjelű (OP – Out of Phase Test). [9] A fenti három vizsgálati módra a továbbiakban alkalmazzuk az alábbi terminológiákat:

- Izotermikus fárasztóvizsgálat (IZOT).
- Szinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat (Szinkron TMF).
- Aszinkron termomechanikai fárasztóvizsgálat (Aszinkron TMF).

A kisciklusú fárasztóvizsgálatokhoz merev, nagy rugóállandójú berendezéseket használnak, amelyen a keresztfej elmozdulása megfordítható, és a húzó-nyomó igénybevételhez szükséges alternáló mozgás a próbatest hossz- illetve keresztirányú mérete szerint vezérelhető. Általában elektronikus vagy elektrohidraulikus mozgató berendezést alkalmaznak, mellyel a vezérlés könnyen megvalósítható. A nyúlást mérhetjük hossz- és keresztirányú extenzométerek alkalmazásával. [4] Termomechanikus fárasztás során és növelt hőmérsékleten történő mérésekhez optikai elven működő érzékelőket, vagy megfelelő hőálló anyagú tapintóval ellátott elmozdulás-mérőket használnak.

A próbatest előírt hőmérsékletre történő felfűtését konvektív úton klímakamrában [10], [11] indukciós tekercsekkel [9], [12], vagy ellen-

[9] Ramesh, M.–Hans J. L.–Diener, M.–Spolenak, R. (2011): Conducting thermomechanical fatigue test in air at light water reactor relevant temperature intervals. *Journal of Nuclear Materials*. 415. Pp. 23–30.

[10] Colombo, F.–Mazza, E.–Holdsworth, S. R.–Skelton, R. P. (2008): Thermo-mechanical fatigue tests on uniaxial and component-like 1CrMoV rotor steel specimens. *International Journal of Fatigue*. 30. Pp. 241–248.

[11] Kerezi, B. B.–Kotousov, A. G.–Price J. W. H. (2000): Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 77. P. 425.

[12] Shankar, V.–Bauer, V.–Sandhya R.–Mathew M. D.–Christ, H. J. (2012): Low cycle fatigue and thermo-mechanical fatigue behavior of modified 9Cr–1Mo ferritic steel at elevated temperatures. *Journal of Nuclear Materials*. 420. Pp. 23–30.

[11] Kerezsi, B. B.–Kotousov, A. G.–Price J. W. H. (2000): Experimental apparatus for thermal shock fatigue investigations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 77. P. 425.

[13] Petersen, C.–Rodrian, D. (2008): Thermo-mechanical fatigue behavior of reduced activation ferrite/martensite stainless steels. *International Journal of Fatigue*. 30. P. 339.

[14] Constantinescu, A.–Charkaluk, E.–Lederer, G.–Verger, L. (2004): A computational approach to thermomechanical fatigue. *International Journal of Fatigue*. 26. Pp. 805–818.

[15] Haddar, N.–Köster, A.–Kchaou, Y.–Remy, L. (2012): Thermal-mechanical and isothermal fatigue of 304L stainless steel under middle range temperatures. *C. R. Mecanique*. 340. Pp. 444–452.

[16] Kudo, Y.–Kikuchi, K.–Saito, M. (2002): Thermal fatigue crack propagation behaviour of F82H ferritic steel. *Journal of Nuclear Materials*. 307. P. 471.

állás fűtéssel (Joule-hővel) [13], [14], [15] végzik. A hőmérsékleti ciklusok maximális elérhető frekvenciája az előbbi felsorolás szerint növekszik. A hűtés a befogópofákon keresztül vízhűtéssel, a próbatestre szórt vízpermettel, valamint a próbatestre fűjt sűrített levegővel lehetséges [11], [16].

A tönkremeneteli kritérium meghatározásában nem egységes a szakirodalom. A legelterjedtebb és mérnöki szempontból a legmegalapozottabb, amikor a terjedőképes repedés megjelenését tekintik a tönkremenetelnek. Mivel ennek vizsgálattechnikai megvalósítása bonyolult, ezért több kritérium létezik [16], [MSZ 4363: 1992]:

- a próbatest kettéválása,
- a hiszterézis-görbe nyomó periódusában inflexiós pont megjelenése (két repedt próbatestrész felfekvése),
- a stabil szakasz maximális feszültségéhez viszonyított csökkenés,
- az előző ciklushoz képest meghatározott mértékű feszültségésés.

A kisciklusú fárasztóvizsgálatok alapvető célja, a külső igénybevételek (mechanikai- és hőterhelések, környezeti hatások) és az adott berendezés szerkezeti anyagának válasza (élettartama) közötti összefüggések meghatározása laboratóriumi körülmények között. A vizsgálatok értékelése, azaz a károsodásra vonatkozó kritériumok a használt alap paraméter szempontjából két fő csoportba oszthatók:

- Alakváltozás vagy feszültség-alapú modellek.
- Képlékeny alakváltozási energia-alapú modellek.

A károsodást jelző paramétert vizsgálva megállapítható, hogy az első csoport tenzor, míg a második skaláris mennyiség. Mivel az anyag károsodását kisciklusú fáradás során a folyáshatár értékét jelentősen meghaladó igénybevétel ciklikus változása okozza, ezért a fárasztóvizsgálatok adatainak értékelését a leggyakrabban képlékenyalakváltozás-amplitúdón alapuló mérnöki modellekkel végzik.

Az alakváltozás vagy feszültség-amplitúdóra épülő modellek tekinthetők a klasszikus módszereknek. Ezek általános egyenlete:

$$\Phi(\varepsilon_a, \varepsilon_{a,p}, \sigma_a) = f(N_f, \sigma_f, \varepsilon_f, \kappa, \vartheta, \dots), \quad (1)$$

melyben a baloldalon a terhelési paraméterek szerepelnek, az egyenlet jobb oldalán a tönkremeneteli ciklusszám, és  $\sigma_f$ ,  $\varepsilon_f$ ,  $\kappa$  és  $\vartheta$  anyagi állandók (illesztési paraméterek). A Coffin–Manson-egyenlet még ma is a legismertebb összefüggés annak ellenére, hogy 1954-ben publikálták. Lineáris kapcsolatot ad a képlékenyalakváltozás-amplitúdó és a tönkremeneteli ciklusszám között logaritmikus koordináta-rendszerben:

$$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon_f \cdot N_f^\vartheta, \quad (2)$$

ahol  $\varepsilon_f$  és  $\vartheta$  a modell illesztési paraméterei.

Az összefüggés jó közelítést eredményez bemetszés nélküli, hengeres próbatestek állandó amplitúdójú és frekvenciájú terhelésénél. A növelt hőmérsékleten bekövetkező kúszás, oxidáció és korrózió okozta károsodás hatásának figyelembevételéhez a frekvenciát figyelembe vevő tényezővel módosították a Coffin–Manson-modellt.

A teljes alakváltozás és a tönkremeneteli ciklusszám kapcsolatára Morrow javasolt összefüggést, melyet a szakirodalom teljes alakváltozás–élettartam egyenletnek nevez. Ez összegzetten ír le két különálló görbét, a rugalmas alakváltozás amplitúdó-ciklusszám, valamint a képlékeny alakváltozás amplitúdó-ciklusszám-kapcsolatát. Az egyenlet első tagja a Basquin-összefüggés, a második a korábban ismertetett Coffin–Manson-egyenlet.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a fásztótvizsgálat során a közép feszültség ( $\sigma_m$ ) értéke jelentős hatással van a kifáradási élettartamra, ezért ennek a tényezőnek a figyelembevételére számos összefüggés született. A közép feszültség-korrektív modellek leggyakrabban alkalmazott összefüggése Morrow egyenlete, mely a közép feszültség élettartamra gyakorolt hatását az alakváltozás–élettartam összefüggés rugalmas tagjának módosításával vette figyelembe. A formulát széles körben alkalmazták és validálták acélok kis képlékenyalakváltozás-amplitúdón végzett fásztótvizsgálatára. Smith, Watson és Topper a  $\sigma_a \varepsilon_a$  paramétert javasolták a cikluson belüli fáradás mértékének meghatározására, melyben  $\sigma_a$  a ciklus feszültség amplitúdója,  $\varepsilon_a$  a teljes alakváltozás amplitúdó (a szerzők neveiből: SWT-modell). Az SWT-modellt sikeresen alkalmazták öntöttvasak, mikroötvözött acélok és ötvözött acélok kisciklusú fáradásának leírására. Fontos megemlíteni, hogy a legtöbb korszerű végelemez-szoftver fáradási modulja tartalmazza ezt a modellt. A klasszikus fáradási modelleket az alábbi táblázatban foglaltuk össze. [2]

[2] Fekete B. (2016): *VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fáradása*. Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék.

[17] Lagoda, T. (2001): Energy models for fatigue life estimation under uniaxial random loading. Part I.: The model elaboration. *International Journal of Fatigue*. 23. Pp. 467–480.

[18] Korsunsky, M. A.–Dini, D.–Dunne, P. E. F.–Walsh, J. M. (2007): Comparative assessment of dissipated energy and other fatigue criteria. *International Journal of Fatigue*. 29. Pp. 1990–1995.

2. táblázat. klasszikus fáradási modellek

Modell	$\Phi$	$f$	Hivatkozás
Coffin-Manson	$\varepsilon_{a,p}$	$\varepsilon_f \cdot N_f^g$	[Coffin, 1954]
Módosított Coffin-Manson	$\varepsilon_{a,p}$	$\varepsilon_f \cdot (N_f \nu^k)^g$	[Coffin, 1974]
Teljes alakváltozás	$\varepsilon_a$	$\frac{\sigma_f}{E} (N_f)^\kappa + \varepsilon_f \cdot (N_f)^g$	[Morrow, 1965]
Morrow	$\sigma_m, \varepsilon_a$	$\frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (N_f)^\kappa + \varepsilon_f \cdot (N_f)^g$	[Morrow, 1968]
SWT	$\sigma_a, \varepsilon_a$	$\frac{(\sigma_f)^2}{E} (N_f)^{2g} + \sigma_f \varepsilon_f (N_f)^{g+\kappa}$	[Smith et al., 1970]

Az előzőekben ismertetett klasszikus modellekhez képest a képlékeny alakváltozási energiára épülő összefüggéseknek több előnyük van. Az egyik ilyen előny, hogy a vezérelt változótól (alakváltozásra vagy feszültségre vezérelt vizsgálat) független a mérés eredménye, a másik, hogy a meghatározott mérőszám fizikailag megalapozottabb, mint a korábban bemutatottak. Skaláris jellegéből adódóan az energiaalapú kritériumok a számítások során a valós szerkezetre könnyebben átvihetők, és alkalmazásukkal a halmozódó károsodás számítása is egyszerűbb. [17] Felhasználásuknak hosszú ideig határt szabott, hogy a gépészeti berendezések kritikus helyein nehéz volt meghatározni a szerkezettel közölt képlékeny alakváltozási munka mennyiségét. A numerikus módszerek és a számítástechnika fejlődésével az energiaalapú méretezés e korlátja megszűnt. [18]

Az energia típusú modellek alapfeltevése, hogy a ciklusonként közölt és összegzett képlékeny alakváltozási munka arányos a károsodási folyamat által felemésztett munkával. Az energiaalapú modellek leggyakrabban alkalmazott formája szerint a tönkremeneteli kritériumnak megfelelő összegzett alakváltozási energia ( $W_f$ ), valamint a ciklusszám között ( $N_f$ ) az alábbi összefüggés áll fenn:

$$W_f = C \cdot N_f^{\gamma_f}, \quad (3)$$

ahol  $C$  és  $\gamma_f$  anyagi konstansok. Az alábbi táblázatban a fenti modell illesztési paramétereire mutatok példákat acélokön végzett fárasztóvizsgálatok mérési adataira vonatkozóan.

3. táblázat. Az energiaalapú (3) modell szakirodalomban megtalálható paramétereit

Anyagminőség	Vizsgálati Hőmérséklet [°C]	Fáradási szívósság együttható, C [mJ/mm <sup>3</sup> ]	Fáradási szívósság kitevő, $\gamma_f$ [-]	Referencia
gyengén ötvözött acél, A516Gr70	20	603	0.389	[Lefebvre and Ellyin, 1984]
betonacél, BS 460B	20	226	0.414	[Abdalla et al., 2009]
betonacél, BS B500B	20	205	0.449	[Abdalla et al., 2009]
2.25Cr-1Mo	540	391	0.312	[Callaghan et al., 2010]
2.25Cr-1Mo (miniatűr próbatest)	540	242	0.298	[Callaghan et al., 2011]
gyengén ötvözött acél	20	612	0.344	[Luo et al., 2012]

Az (3) egyenlettel megegyező szerkezetű összefüggéssel írható le a ciklusonként közölt alakváltozási energia ( $W^{stab}$ ), valamint a ciklusszám kapcsolata:

$$W^{stab} = B \cdot N_f^{\beta_f}, \quad (4)$$

ahol  $B$  és  $\beta_f$  a modell illesztési paramétereit.

A fenti klasszikusnak tekinthető energiaalapú modellek számos módosított változatát publikálták a közép feszültség, a hőmérséklet és a próbatestek méretének figyelembevételére. Lee és munkatársai a tönkremenetelig szükséges alakváltozási energia törési munkával dimenziómentessé tett mennyiségét javasolta a károsodási paraméternek a hőmérséklet hatásának figyelembevételére. A modell alapon dolata a törési munka hőmérsékletfüggésének kihasználása volt. Az összefüggést ausztenites szövetszerkezetű korrózióálló acélok emelt hőmérsékletű fárasztóvizsgálatainak eredményei alapján validálták. Gocmez és munkatársai belsőégésű motorokban alkalmazott öntöttvasak termomechanikus kisciklusú fáradási viselkedésének leírására módosították a (3) szerinti modellt, melynek alap-paramétere a ciklusonként elnyelt alakváltozási energia. A model további korrekciós tényezőket tartalmaz a közép feszültségnek és a hőmérséklet hatásának figyelembevételére. [2]

Az energiaalapú kritériumok tárgyalásánál fontos megemlíteni, hogy kisciklusú fárasztás során bevitt képlékeny alakváltozási munka csak egy része okozza az anyag mikroszerkezetének megváltozását (károsodását), a munka másik része a fárasztás során hővé alakul és átadódik a környezetnek. Kutatások bizonyítják, hogy a hőfejlődés mértéke erősen függ az alakváltozás körülményeitől (alakváltozás mértéke és sebessége) és az anyag mikroszerkezetétől.

[2] Fekete B. (2016): VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fáradása. Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék.

[2] Fekete B. (2016): *VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fátadása*. Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék.

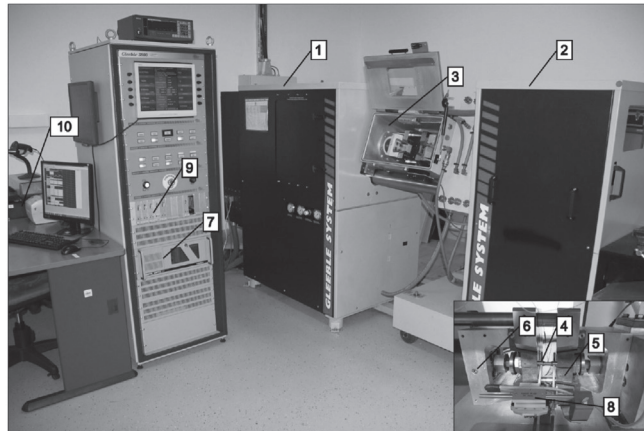
[19] Berezki, P.–Szombathelyi V.–Krallics, Gy. (2014): Determination of flow curve at large cyclic plastic strain by multiaxial forging on MaxStrain System. *International Journal of Mechanical Sciences*. 84. P. 182.

Ezek alapján kijelenthető, hogy a kisciklusú fátadási folyamat energetikai értékelése során a vizsgálattechnikai körülmények a modellekben nem kezelt hőenergián keresztül igen nagy bizonytalanságot jelentenek, és kérdéses, hogy az így adódó mérőszámok a valós szerkezet viselkedését mennyire modellezik megfelelően. [2]

## A kísérleti környezet

A méréseket egy Gleeble 3800 típusú fizikai szimulátoron hajtottuk végre, amely a 2. ábrán látható. A berendezés egy többfunkciós szimulátor, amely különböző fémtechnológiai és fémteni folyamatok fizikai szimulációjára, fémes szerkezeti anyagok termomechanikus kezeléseire és anyagvizsgálatára egyaránt alkalmas. [19] Fontos hangsúlyozni, hogy a szimulátor nem célberendezés, tehát minden kísérletet egyedileg kell műszerezni, installálni és hozzá mérési programot írni.

**2. ábra. A Gleeble 3800 termomechanikus fizikai szimulátor a fátástóvizsgálatokhoz alkalmazott átalakító egységgel**





A berendezés két jól elhatárolható része a termikus és a mechanikai rendszer, amelyeket a főegység (1) és az ahhoz csatlakoztatott, az aktuális vizsgálathoz használható Mobil Átalakító Egység (2) együttese alkotja. A fémtani folyamatok fizikai szimulációja a vizsgálókamrában (3) valósul meg, ahol a próbatesteket (4) a megfelelően választott befogópofák (5) közé helyezve végrehajtható a felhasználó által előírt termikus és mechanikai terhelési program. A termikus és a mechanikai rendszer az alábbiak szerint működik.

## A kísérleti anyag

A kutatómunkánkhoz felhasznált hegesztési varratot a 3. ábra szemlélteti. A darabot a reaktortartály gyártóművében, a plzeni Škoda Energetikai Gépgyárban készítették a paksi reaktortartályok gyártásával egyidőben.

3. ábra. Kutatómunkához felhasznált próbatestek alapanyaga



Az ábrán látható alapanyag 140 mm vastag Cr-Mo-V ötvöztű, ferrites szerkezetű acél, amelyet kovácslást követően a kiváló keményedés állapotára hőkezelték. Ez az anyagszerkezeti állapot a tartós mechanikai és hőigénybevétel szempontjából stabil. A nyíllal jelölt oldalát titánnal stabilizált króm-nikkel ötvöztű korrózióálló plattírozással látták el.

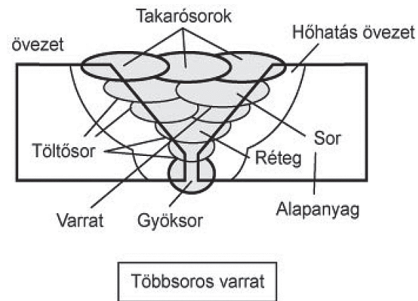
A mintadarab jellegzetessége, hogy középen teljes keresztmetszetében hegesztési varrat húzódik, melynek vizsgálata jelen kutatómunkánk célkitűzése. A próbatestek elkészítését megelőzően elvégezzük a mintadarab hegesztési varratának makro-metallográfiai vizsgálatát.

Az alábbi (4. ábrán) a metallográfiai maratás eredményét láthatjuk. Az ábrán kirajzolódik a többrétegű, fedőhegesztéssel lezárt varrat szerkezete, valamint a hőhatásövezete, ahogy azt az 5. ábrán látható tankönyvi példa is illusztrálja.

4. ábra. A hegesztett kötésről készített makro-metallográfiai felvétel

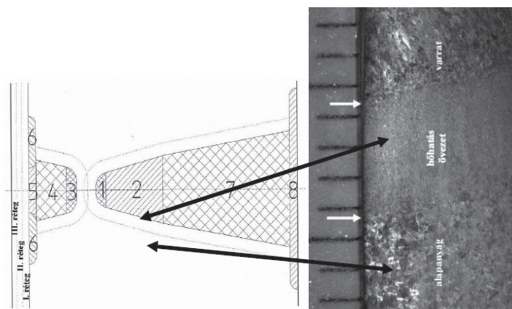


5. ábra. Többsoros varrat felépítése



A hegesztett kötés sematikus ábráját láthatjuk a 6. ábrán.

6. ábra. A reaktortartály hegesztési varratának sematikus ábrája



A szerkezeti integritásvizsgálatokhoz szükséges próbatest-darabszám meghatározásához elengedhetetlen a varrat szövetszerkezeti homogenitásának ismeretén felül a varrat összetételének homogenitása is. Annak érdekében, hogy meghatározzuk az ötvözőtartalom-eloszlást a varrat keresztmetszete mentén, a 6. ábrán számokkal jelölt helyeken összetételvizsgálat céljából mintavételezést végeztünk.

Az összetételvizsgálatot ICP-OES vizsgálóberendezéssel végeztük el. A vizsgálathoz mintánként 5g forgácsot használtunk fel, amiket csigafúróval, a varrat felületére merőleges, 12–15mm mély fúrással nyertünk ki az alapananyagból. A mintavételek módját és helyét láthatjuk az 7. ábrán.

7. ábra. ICP-OES összetételvizsgálathoz végzett mintavételek pozíciója



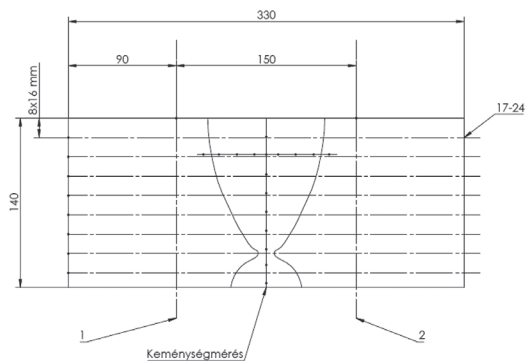
A mérési eredmények ismeretében kijelenthetjük, hogy a hegesztési varrat az első töltősor kivételével teljes keresztmetszetében egyenletes összetételeloszlást mutat.

## A próbatetek gyártása

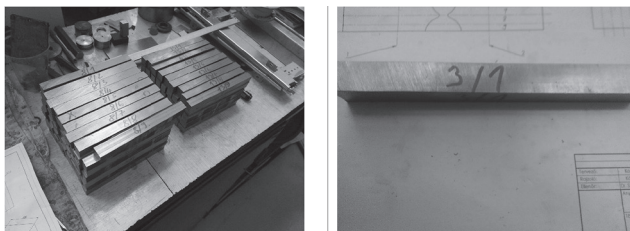
A próbatetek befoglaló méreteinek, illetve a hegesztett tömb méreteinek ismeretében meghatároztuk a hegesztési varrat darabolási tervét, amit a 8. ábra szemléltet. Az elkészült darabolási terv (8. ábra) illetve a varrat szövetképének (4. ábra) ismeretében megtörtént a varratot tartalmazó tömb darabolása és a próbatest-előgyártmányok elkészítése.

Az elkészült próbatest-előgyártmányokat a 9. ábra szemlélteti.

**8. ábra. Darabolási terv**



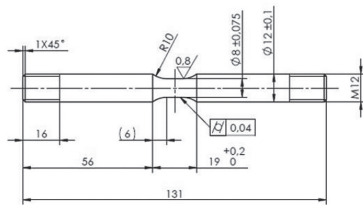
**9. ábra. Az esztergáláshoz előkészített előgyártmányok**



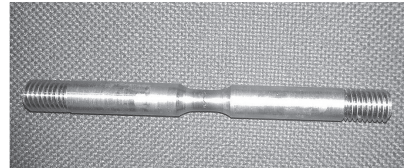
A kísérletekhez mintegy 80 db próbatest-előgyártmányt készítettünk elő úgy, hogy azok pontos helyét egy (X,Y) koordinátával megjelöltük, ezáltal a varratban elfoglalt helyük pontosan beazonosíthatóvá vált.

A darabolás első fázisában egy, a varratkeresztmetszettel párhuzamos szelet levágása történt, amelyen ismételt metallográfiai vizsgálatot végeztünk. Ennek célja a varratkontúr, illetve a hőhatás-övezet láthatóvá tétele, valamint a keménységmérés elvégzésének megkönnyítése (lásd: 10. ábra).

10. ábra. Az esztergált próbatest



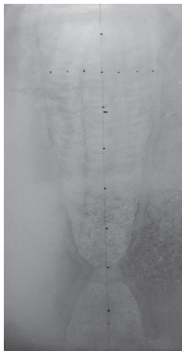
(a)



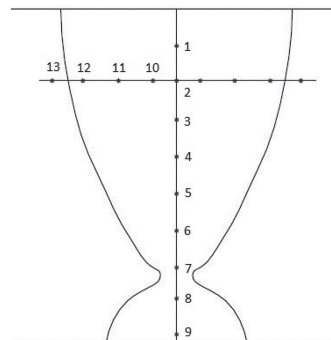
(b)

Az előkészített varratszelvényen, a varrat keménységeloszlásának feltérképezése érdekében a 11. ábrán jelölt helyeken keménységmérést végeztünk, elkészítve ezzel a varrat keménységterképét. A kísérlethez Vickers-eljárást alkalmaztunk, 10 kp terhelőerő alkalmazása mellett.

11. ábra. A keménységmérés mérési pontjai

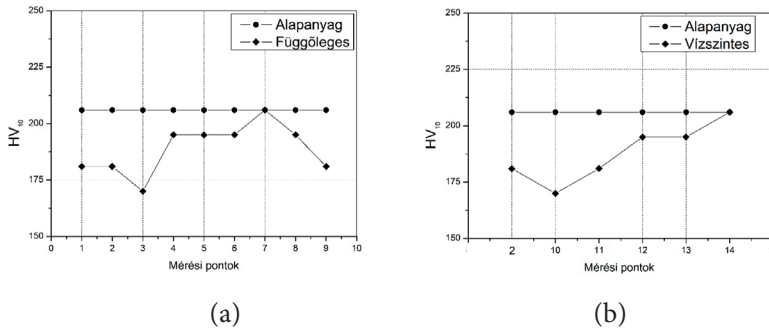


(a)



(b)

12. ábra. A keménységmérés eredményei

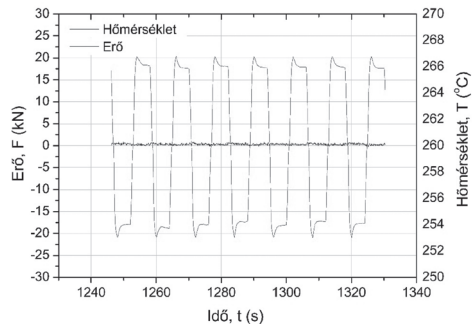


A mérési eredményeket a 12. ábra tartalmazza. A mért értékekből látható, hogy a keménységeloszlás egyenletes, annak ingadozása hibahatáron belül van. A varrat lágy állapotú, annak keménysége közel azonos az alapanyag keménységével.

## Izotermikus és termomechanikus fárasztókísérletek végrehajtása, mérési eredmények

### IZOTERMIKUS FÁRASZTÓVIZSGÁLATOK

13. ábra. Példa a fárasztóvizsgálatok során rögzített adatokra. (15H2MFA, IZOT)



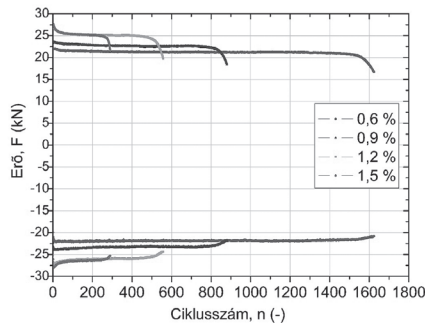
Az izotermikus és termomechanikus fárasztóvizsgálatokat négy különböző terhelési szinten, három ismétléssel hajtottuk végre a kísérleti anyagokon, amely összesen 48 mintát eredményezett. Az alakváltozás, az erő- és a hőmérséklet-adatokat 100 Hz-cel mintavételeztük. A 13. ábra a regisztrált adatokra mutat példát 0,6% teljes alakváltozás-terhelésre vonatkozóan.

A bemutatott adatok a fárasztóvizsgálatok ciklikus mechanikai viselkedés szempontjából stabil szakaszból származnak. A mérési adatokat elemezve megállapítható volt, hogy a fizikai mennyiségek előírt időfüggvénye és a mért értékek igen jó egyezést mutattak az összes beállításra vonatkozóan.

## Kísérleti anyagok ciklikus mechanikai viselkedése

Az anyag ciklikus mechanikai viselkedése az alakváltozás vezérelt kisciklusú fárasztóvizsgálatok egyik fontos tényezője. A vizsgálatok kezdeti szakaszán tapasztalható lágyulás vagy keményedés, valamint ezek intenzitásának függése a különböző paramétereiktől (alakváltozás-amplitúdó; alakváltozási sebesség) határozzák meg, hogy a fárasztóvizsgálat stabil szakaszába lépve milyen feszültség szinten megy végbe a vizsgálat. A feszültségek szélsőértékeit ábrázoltuk a halmozódó károsodás függvényében a 14. ábrán.

14. ábra. A ciklusonként regisztrált feszültségek szélsőértékei 15H2MFA IZOT



A 15H2MFA anyag ciklikus mechanikai viselkedése a hasonló szilárdságú térben középpontos, szabályos rácsú acélokéval megegyező jelleget mutat. A vizsgálatok kezdeti szakaszán intenzív ciklikus lágyulást tapasztaltunk, majd a további terhelés hatására a stabil ciklusok alatt másodlagos lágyulási szakasz következett, amely egészen a makroszkopikus méretű repedés megjelenéséig tartott. A repedés megjelenése és terjedése a 14. ábra feszültség-diagramjaiban látható határozott csökkenés kezdőpontjához köthető.

## Mérések értékelése Coffin–Manson szerint

A kísérleti adatok Coffin–Manson-moddal történő értékeléséhez terhelési szintenként meghatároztuk a képlékenyalakváltozás-amplitúdó értékét majd regressziószámítással felvettük az egyes fásztási munkarendekhez tartozó görbéket.

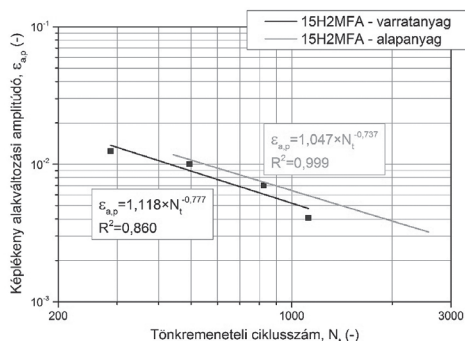
Ehhez valamennyi terhelési szinten minden próbatest esetében kiválasztottuk az átlagos törési ciklusszám feléhez tartozó fásztási ciklus valódi feszültség–valódi alakváltozás hiszterézis görbét. A rugalmas szakasz illesztését követően meghatároztuk a képlékenyalakváltozási-amplitúdó mértékét a húzó, illetve a nyomó periódusra is. Adott terhelési szinten az összes így meghatározott  $\epsilon_p$  érték átlagát tekintettük a mértékadó képlékenyalakváltozási-amplitúdónak.

A korábbi szakirodalmi áttekintésben leírtak szerint az energetikai berendezések nagy igénybevételi szintje és az üzemállapotok közötti nagy eltérések komplikálttá tehetik a halmozódó károsodás alakváltozási amplitúdó alapján történő számítását. A különböző energetikai modellek szerinti klasszikus kiértékeléshez meg kellett határoznunk a ciklusonként közölt, valamint a tönkremenetelig összegzett alakváltozási energiát az összes próbatest mérési adatai alapján. A ciklusonkénti energiát ( $W^{\text{stab}}$ ) a fenti ábrákon látható valódi alakváltozás–valódi feszültség adatvektorokból (hiszterézis hurkok) numerikus integrálással határoztuk meg. Ebből az összegzett alakváltozási energiát úgy kaptuk meg, hogy az aktuális alakváltozási amplitúdóhoz tartozó  $W^{\text{stab}}$  értéket összesoroztuk a vonatkozó átlagos törési ciklusszámmal. Az egyes alakváltozási amplitúdókhoz így kapott energiaértékeket szintén a fenti ábrákon láthatjuk.

Az izotermikus fásztóvizsgálatokra számított átlagos képlékenyalakváltozási-amplitúdók és átlagos törési ciklusszámok felhasználásával meghatároztuk a 15H2MFA reaktortartály anyag hegesztett kötéseinek kisciklusú kifáradási viselkedését a Coffin–Manson-moddal szerint. Ehhez a modell hatványfüggvénnyel leírt összefüggését linearizáltuk, majd a képlékenyalakváltozási-amplitúdó–törési ciklusszám ilyen módon átszámított értékpárjaira regressziószámítással egyenest illesztettünk. Az illesztéssel kapott A és B együtthatókat visszahelyettesítve a Coffin–Manson-moddal eredeti összefüggésébe, a 15. ábrán, logaritmikuskálán láthatjuk a varratanyag, illetve egy előző kutatásból származó eredmények alapján az alapanyag kisciklusú kifáradási viselkedését leíró görbéket.



15. ábra. A képlékenyalakváltozási-amplitúdó a tönkremeneteli ciklusszám függvényében az alapanyagra és a hegesztési varratra vonatkoztatva



A 15. ábrán látható, hogy a varratanyag érzékenyebb az izotermikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója kisebb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak nagyobb a szórása. Az 4. táblázatban összegeztük a Coffin–Manson-modell szerinti anyag-egyenletek együtthatóit és kitevőit.

4. táblázat. A Coffin–Manson-modell szerinti anyag-egyenletek együtthatói és kitevői

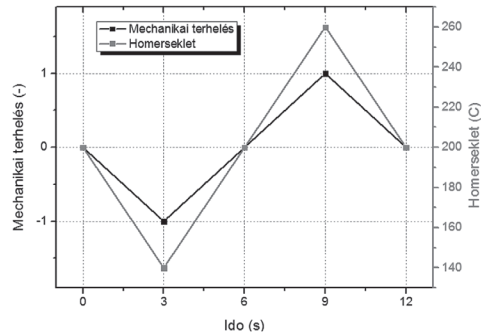
Anyag	Modell	Fáradási szívósság együttható, ( $\epsilon'_f$ )	Fáradási szívósság kitevő, ( $\theta$ )	Determinációs együttható ( $R^2$ )
Alapanyag	$\epsilon_{a,p} = \epsilon'_f \cdot N_f^\theta$	1,047	-0,737	0,999
Varratanyag		1,118	-0,777	0,860

## Termomechanikus fárasztóvizsgálatok

A termomechanikus fárasztóvizsgálatok során a GLEEBLE 3800 termikus rendszere segítségével időben változó hőmérsékletmezőt működtettünk a mérés során. A szabályozás a próbatestre a befogópofáktól szimmetrikusan, középen felhegesztett K-típusú termoelem segítségével történt. E pont hőmérsékletét a befogó rézpofákon keresztül történő ellenállás-fűtéssel továbbá a beszúrási szakaszra fűvott levegővel, a

rézprofák hűtése mellett ciklikusan változtattuk – a mechanikai terhelésekkel szinkronban. Az így adódó termikus peremfeltételekből és terhelésekből a próbatesten az alábbi mechanikai- és hőmérséklet-terhelést valósítottuk meg (16. ábra).

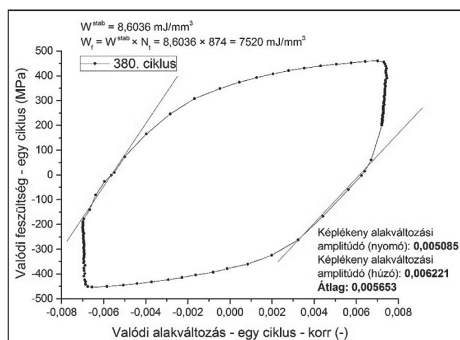
16. ábra. A fázisvizsgálat idő-mechanikai terhelés, idő-hőmérséklet diagramja



#### A MÉRÉSEK ÉRTÉKELÉSE A COFFIN–MANSON SZERINT

A termomechanikus fázisvizsgálatok során mért adatok kiértékelését kezdtük meg a 15H2MFA minőségű varratanyag kisciklusú fáradási tulajdonságainak kvantitatív jellemzéséhez. A kísérleti adatok Coffin–Manson-moddal történő értékeléséhez terhelési szintenként meghatároztuk a képlékenyalakváltozás-amplitúdó értékét. Ehhez valamennyi terhelési szinten minden próbatest esetében kiválasztottuk az átlagos törési ciklusszám feléhez tartozó fáradási ciklus valódi feszültség–valódi alakváltozás histerézis görbéjét. A rugalmas szakasz illesztését követően meghatároztuk a képlékenyalakváltozási-amplitúdó mértékét a húzó, illetve a nyomó periódusra is. Adott terhelési szinten az összes így meghatározott  $\epsilon_a, p$  érték átlagát tekintettük a mértékadó képlékenyalakváltozási-amplitúdónak. A 17. ábrán láthatók – többek között – a különböző terhelési szintekre meghatározott átlagos képlékenyalakváltozási-amplitúdók.

17. ábra. 0,6%-os teljes alakváltozási amplitúdó

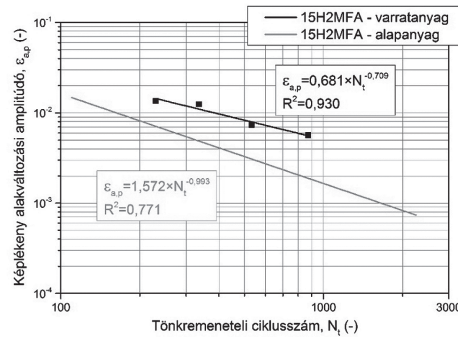


A korábbi szakirodalmi áttekintésben leírtak szerint az energetikai berendezések nagy igénybevételi szintje és az üzemállapotok közötti nagy eltérések komplikálttá tehetik a halmozódó károsodás alakváltozási amplitúdó alapján történő számítását. A különböző energetikai modellek szerinti klasszikus kiértékeléshez meg kellett határoznunk a ciklusonként közölt, valamint a tönkremenetelig összegzett alakváltozási energiát az összes próbatest mérési adatai alapján. A ciklusonkénti energiát ( $W^{\text{stab}}$ ) a fenti ábrákon látható valódi alakváltozás–valódi feszültség adatvektorokból (hiszterézis hurkok) numerikus integrálással határoztuk meg. Ebből az összegzett alakváltozási energiát úgy kaptuk meg, hogy az aktuális alakváltozási amplitúdóhoz tartozó  $W^{\text{stab}}$ -értéket összeszoroztuk a vonatkozó átlagos törési ciklusszámmal. Az egyes alakváltozási amplitúdókhoz így kapott energiaértékeket szintén a fenti ábrákon láthatjuk.

Az előzőekben a termomechanikus fárasztóvizsgálatokra számított átlagos képlékenyalakváltozási amplitúdók és átlagos törési ciklusszámok felhasználásával meghatároztuk a 15H2MFA reaktortartályanyag hegesztett kötéseinek kisciklusú kifáradási viselkedését a Coffin–Manson-modell szerint. Ehhez a modell hatványfüggvénnyel leírt összefüggését linearizáltuk, majd a képlékenyalakváltozási-amplitúdó–törési ciklusszám ilyen módon átszámított értékpárjaira regressziószámítással egyenest illesztettünk.

Az illesztéssel kapott A és B együtthatókat visszahelyettesítve a Coffin–Manson-modell eredeti összefüggésébe, a 18. ábrán, logaritmikus skálán láthatjuk a varratanyag, illetve egy előző kutatásból származó eredmények alapján az alapanyag termomechanikus kisciklusú kifáradási viselkedését leíró görbéket.

18. ábra. A varratanyag, illetve az alapanyag termomechanikus kisciklusú kifáradási viselkedését leíró görbék



A 18. ábrán látható, hogy a varratanyag érdekes módon kevésbé érzékeny a termomechanikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója nagyobb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak kisebb a szórása. A 4. táblázatban összegeztük a Coffin–Manson-modell szerinti anyaggyenletek együtthatóit és kitevőit.

4. táblázat. Coffin–Manson-modell szerinti anyaggyenletek együtthatói és kitevői

Anyag	Modell	Fáradási szívósság együttható, ( $\epsilon'_f$ )	Fáradási szívósság kitevő, ( $\vartheta$ )	Determinációs együttható ( $R^2$ )
Alapanyag	$\epsilon_{a,p} = \epsilon'_f \cdot N_f^\vartheta$	1,572	-0,993	0,771
Varratanyag		0,681	-0,709	0,930

## Összefoglalás

A nyomottvizes reaktorok reaktortartálya az atomerőművek biztonsága szempontjából kiemelt fontosságú berendezés. Nagy nyomáson és hőmérsékleten üzemel, magában foglalja a reaktor aktív zónáját, ezen felül nem cserélhető berendezés, tehát meghatározza a reaktor műszakilag lehetséges üzemidejét. A reaktortartály egyik meghatározó károsodási folyamata az indítások és leállások, a terhelésváltozások valamint az esetleges üzemzavari állapotok okozta mechanikai és hőterhelések eredményeként bekövetkező kisciklusú fáradás. A károsodási folyamat előrehaladásával a fáradás hatására számolni kell repedések keletkezésével és terjedésével. Ez a berendezések biztonsági tartalékának folyamatos csökkenéséhez vezethet, ami veszélyezteti szerkezeti integritásukat. [2]

A kutatómunka során célunk volt a szerkezeti anyagok hegesztett kötéseinek névleges élettartamának meghatározása a szerkezeteket ért valóságot minél jobban közelítő igénybevételek figyelembevételével.

Az izotermikus fárasztóvizsgálatokra számított átlagos képlékenyalakváltozási amplitúdók és átlagos törési ciklusszámok felhasználásával meghatároztuk a 15H2MFA reaktortartály-anyag hegesztett kötéseinek kisciklusú kifáradási viselkedését a Coffin–Manson-modell szerint. Megállapítottuk, hogy a varratanyag érzékenyebb az izotermikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója kisebb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak nagyobb a szórása.

Termomechanikus fárasztóvizsgálatok eredményeit értékelve megállapítottuk, hogy a varratanyag kevésbé érzékeny a termomechanikus, képlékeny alakváltozást előidéző mechanikai terhelés okozta hatásokra, mint az alapanyag. Ugyanakkor fontos azt is megemlíteni, hogy a varratanyag illesztésének determinációs együtthatója nagyobb, mint az alapanyagé, azaz a tönkremeneteli folyamatnak kisebb a szórása.

### *Köszönetnyilvánítás*

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta. Köszönetet mondunk Fekete Balázsnak, hogy PhD-munkája során megszerzett tapasztalatait a kutatómunkához rendelkezésre bocsátotta.

[2] Fekete B. (2016): *VVER-440 reaktor szerkezeti anyagok kisciklusú termomechanikai fáradása*. Doktori Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék.



## *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése*

**Összefoglalás:** A projekt során különböző altémákban végeztünk fejlesztéseket, melyeket sikeresen megvalósítottunk. A magnetoakusztikus vizsgálorendszerünkkel, a hozzá kifejlesztett egyedi mérő, adatgyűjtő és kiértékelő szoftverrel acéllemezekben anizotrópia mutatható ki, alumínium lemezek esetében pedig textúravizsgálat végezhető. Páztázó örvényáramos vizsgálorendszerünkkel acélmintákban különböző anyagfolytonossági hibák mutathatók ki. A pástázó ultrahangos vizsgálorendszereinkkel nemcsak forrasztások, hanem műanyag alkatrészek gyártási hibái, valamint NYÁK lemezekben delaminációs vizsgálatok is végezhetőek. Az általunk kifejlesztett vezérlőszoftverekkel végzett mérések eredményei reprodukálhatók és 3D-ben is megjeleníthetők.

**Kulcsszavak:** Magnetoakusztikus vizsgálat; akusztikus emisszió; textúra; alumíniumötvözet.

**Abstract:** During the project we carried out developments in various sub-themes which we successfully implemented. With our magnetoacoustic testing system and the unique measuring, data acquisition and evaluation software anisotropy can be detected in steel sheets and texture testing can be performed in the case of aluminium sheets. With our scanning eddy current testing system various material continuity defects can be detected. With our scanning ultrasonic testing systems not only solderings but also manufacturing defects in plastic parts and delamination tests in PCBs can be performed. The results of measurements performed with the control software developed by us can be reproduced and displayed in 3D.

**Keywords:** Magnetoacoustic method; acoustic emission; texture; wrought aluminium alloys.

\* *Dunaiújvárosi Egyetem,  
Műszaki Intézet*  
E-mail: szabo.peter@uniduna.hu  
E-mail: feherjanosne@uniduna.hu  
E-mail: molnar.janos@uniduna.hu  
E-mail: csincszs@uniduna.hu

## Bevezetés

A projekt kezdetén irodalomkutatást végeztünk a magnetoakusztikus vizsgálati módszert alkalmazó publikációk között. Célunk az akkor számunkra új vizsgálati módszer megismerése, a gerjesztett mágneses tér által az anyagban lezajló folyamatok megértése, detektálása, az adatok gyűjtése, kiértékelése, az eredmények megjelenítése, a módszer alkalmazhatóságátárainak megismerése fémek vizsgálata során.

Szakirodalmi áttekintéseink közül néhányat kiemelve kutatást végeztünk a korszerű anyagok alkalmazhatóságát a magnetoakusztikus anyagvizsgálatok általi felhasználásukat illetően, mint például amorf- és mikrokristályos ötvözetek, valamint nanokristályos anyagok alkalmazhatóságának témakörében. Nem utolsó sorban a doménfal-mozgás hatására létrejövő Barkhausen-zaj témakörében is végeztünk kutatásokat, hiszen vizsgálataink célja ezen jelenség akusztikus emissziós szenzorokkal történő érzékelése. Pásztázó akusztikus mikroszkópia terén az ultrahangos vizsgálati módszer alkalmazhatóságát kutattuk az elektronikai hibaaanlitika területén.

A magnetoakusztikus, a pásztázó ultrahangos és örvényáramos vizsgálatok mindegyikének alapja egy vizsgálórendszer felépítése, melyet olyan szoftver működtet, mely vezérli a mozgatórendszert, adatokat gyűjt és továbbít a PC felé, lehetővé teszi a begyűjtött adatok utófeldolgozását és megjelenítését.

Ebből kiindulva fogalmaztuk meg kezdeti céljainkat:

- A teljes rendszerre vonatkozó fő feladatunk egy teljes szoftveres programstruktúra kialakítása, mely vezérli a szoftvert és minden funkcionális feladatot.
- A mozgítás terén ki kell fejleszteni egy olyan vezérlőt, mely a vizsgálófej folyamatos mozgására képes a már meglévő ISEL-hardverelemek alkalmazásának meghagyása mellett.
- A mérés és adatgyűjtés esetében fontos a gyorsaság, ezért nagy átviteli sebességű mérőkártyát kell a rendszerbe integrálni. A nagy sebességű mérés mellett fontos az ultrahangos jelek nagyfrekvenciás digitális mintavételezése és a PC felé történő gyors adattovábbítása is. Ezek együttesen hatással vannak az elvégzendő vizsgálat időtartamára.
- Fontos az adatok utófeldolgozhatósága és megjelenítése. A mérőprogram által begyűjtött adatokat utólagosan be kell tudni tölteni, ki kell tudni értékelni, melynek eredményét akár diagramon, akár 3D-s modellben ábrázolhatjuk.
- Természetesen hiába jó egy mérés, ha a vizsgálati tárgyat nem sikerül stabilan rögzíteni. Ez főként a pásztázó vizsgálatoknál jelent problémát, ahol a vizsgálófej mozgásából eredő rezgések miatt az egyes képek (A, B, C és D) elmosódottá válnak, így nem értékelhetők. Fontos, hogy gépészeti vonalon stabil tárgymegfogókat fejlesszünk ki univerzális és egyedi változatokban.



A kifejlesztett vizsgálórendszerekhez egyedi vezérlő- és adatfeldolgozó szoftvereket készítettünk LabView környezetben.

Jelen dokumentumban a *Magnetoakusztikus roncsolásmentes vizsgálati módszerek fejlesztése*, valamint a *Pásztázó roncsolásmentes vizsgálati módszerek továbbfejlesztése LabView programozással* témában elért eredményeinket mutatjuk be összefoglaló jelleggel.

## Szoftver- és berendezésfejlesztések

A *magnetoakusztikus vizsgálórendszer* kifejlesztése során a forgó mágneses mező létrehozása elengedhetetlen az anyagban, a mágneses tér pólusváltásainak hatására létrejövő doménfal-mozgások eredményeként létrejövő Barkhausen-zaj keletkezéséhez, melyet akusztikus emissziós szenzorokkal detektálunk.

Eleinte a forgó mágneses teret egy villanymotor átalakításával és a hozzá tartozó vezérlőszoftver megírásával hoztuk létre. A motor forgórészének eltávolítása után egy vasmagos állórészt tettünk a helyére, ami a motor állórészében levő tekerccselés által keltett mágneses erővonalakat hivatott a közvetlenül fölé helyezett lemezmintába vezetni. Bár a vezérlőszoftver megfelelően működött, mégsem sikerült a kívánt effektust létrehozni. A villanymotor sajátos kialakítása miatt a kivezetett mágneses tér erőssége nem volt elegendő a Barkhausen-zaj keltéséhez, így detektálni sem lehetséges.

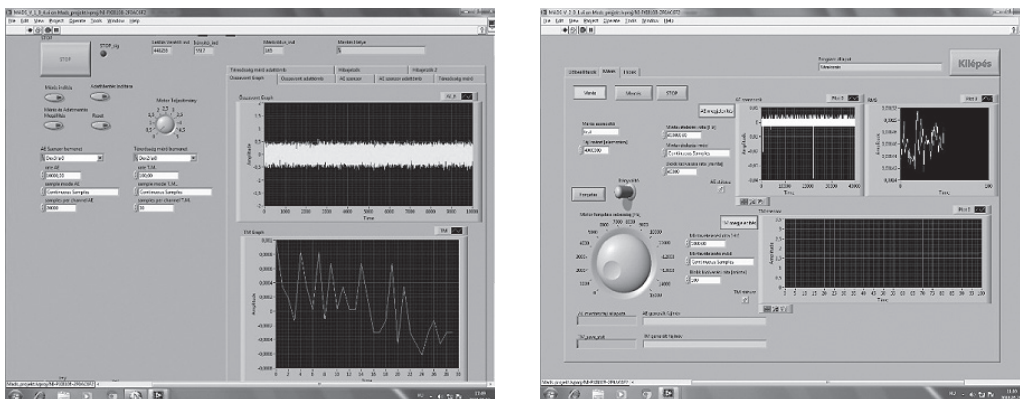
Megvizsgáltuk a lehetőségeket, így az átalakított villanymotor helyett a továbbiakban neodímium mágneset alkalmaztunk, melyről köztudott, hogy erős az állandó mágneses tere. Többféle méretű és erősségű mágnes közül kiválasztottuk a számunkra megfelelőt, melyet egy DC-motorral ellátott forgatómechanizmusra szereltünk. A vezérlőszoftvert átalakítottuk, így lehetővé vált a forgatás sebességének állítása is.

Kísérleteket végeztünk oly módon, hogy a forgatandó mágneset és a 0,5 mm vastagságú vizsgálati tárgyat 2–3 mm távolságban helyeztük el egymástól. Azzal a problémával szembesültünk, hogy a mágnes a vizsgálati tárgy közelsége miatt magához rántotta azt, így a forgatás azonnal megállt, mert a DC-motor nyomatéka nem elégséges ahhoz, hogy legyőzze a kontaktusból származó súrlódást. A mágnes tokozása sem megoldás, mert a súrlódás ebben az esetben is fellép és még ha sikerülne is Barkhausen-zajt detektálni, a felületek súrlódásából keletkező zaj miatt a spektrumokon észrevehetetlen lenne.

Megoldásként léptetőmotoros forgatásra tértünk át és a mágneset egy függőleges tengelyű sízhajtásos mechanizmus hajtott oldalára szereltük. A lemez és vizsgálati tárgy közti távtartásra is találtunk megoldást, így többé már nem jött létre a fizikai kapcsolat a mágnes és vizsgált minta között. Az így létrejött vizsgálórendszerrel folytattuk kísérleti méréseinket, melyek során begyűjtött tapasztalatok alapján további fejlesztéseket hajtottunk végre a vezérlőszoftverben.

A kezelőfelületet átterveztuk és átláthatóbb formába rendeztük (1. ábra).

1. ábra. A kezelőfelület átrendezése (baloldalon a régi, jobboldalon az új)

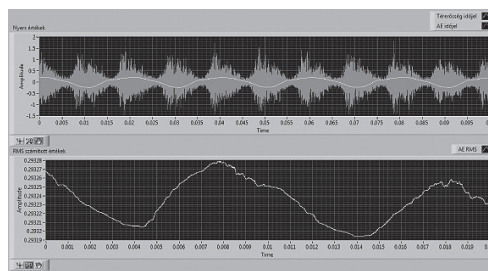
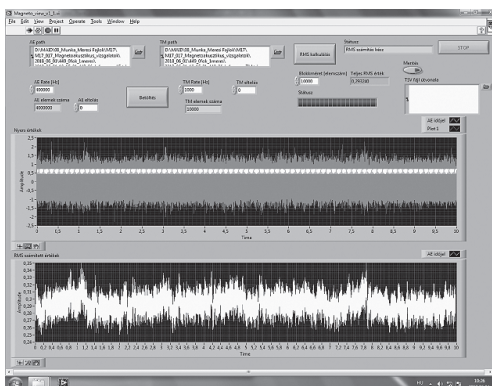


Léptetőmotor vezérlőmodult építettünk be a szoftverbe, így lehetővé vált LabVIEW-felületről többek között a forgásirány-váltás, teljesítményszabályozás, kapcsolókkal további funkciók váltak elérhetővé, folyamatjelző tájékoztató a fájlba írás pillanatnyi állapotáról, valamint előre megadható a fájlméret alapján a mentés automatikus leállítása és megjelent a valós idejű RMS kalkulációs modul is.

A mérőprogram mellett fontos a begyűjtött adatok utófeldolgozása és az eredmények megjelenítése, ezért kifejlesztettük és létrehoztuk a Magneto View elnevezésű utófeldolgozó és megjelenítő szoftvert, mely képes betekintést adni a begyűjtött időjelekbe nagytitkosítással (2. ábra).

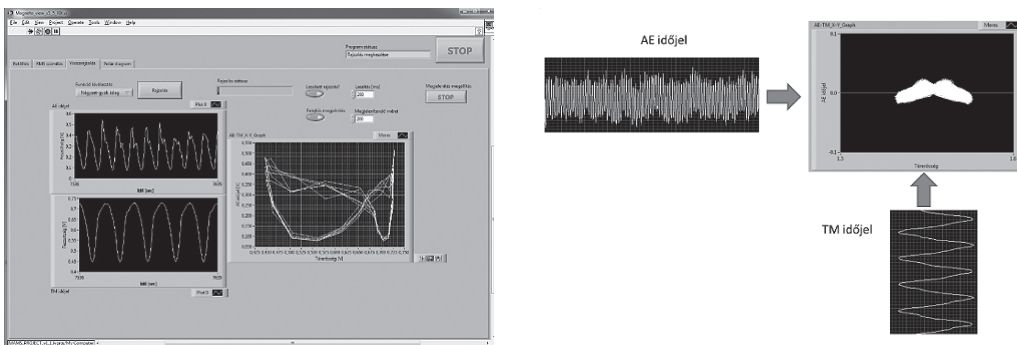
2.a. ábra. A Magneto View szoftver kezelőfelülete

2.b. ábra. A kinagyított időjel



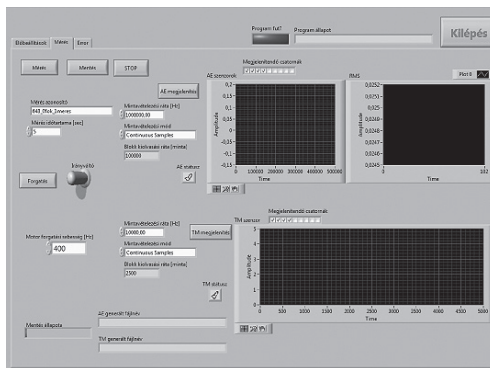
A mágnes pólusváltásokor keletkező akusztikus emissziós jelenségek megjelenítéséhez kifejlesztettünk egy új kiértékelési és megjelenítési eljárást a kiértékelő-alkalmazáshoz, mely egy X-Y gráfot hoz létre a térerősség jel (X) és akusztikus emissziós jel (Y) tengelyeken történő megjelenítésével (3. ábra).

3. ábra. Egy új megjelenítési eljárás



Tapasztalataink alapján átdolgoztuk a mérő- és kiértékelő szoftvereinket és létrehoztuk a MAMS elnevezésű mérőszoftvert, amely 4 csatornás mérési lehetőséget kínál a felhasználónak akár 1 MHz-es mintavételezési frekvenciával. Közös szinkronjellel javítottunk az akusztikus emissziós és mágneses-érzékelő csatornák aszinkron mentésén, státuskijelzéssel.

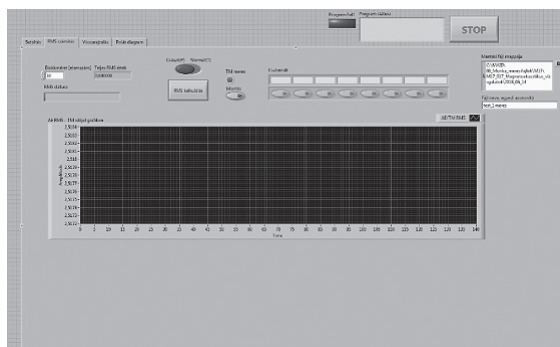
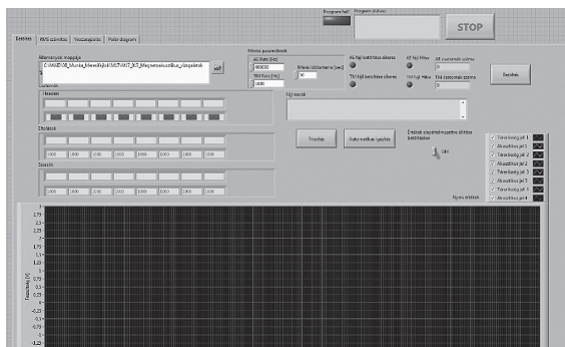
4. ábra. A MAMS mérőrendszer kezelőfelülete



A 4. ábrán a kezelőfelület vízszintes középvonalától felfelé, a jobboldali gráfokon az akusztikus emissziós (továbbiakban AE) szenzorok által adott jelek, valamint a valós idejű RMS-kalkuláció eredményei jelennek meg. Mellettük baloldalon a mérés- és adatmentés-indítás és leállítás gombok találhatóak. Alattuk az aktuális mérésre vonatkozó beállítások, úgymint mérési azonosító, a mérési időtartama, mintavételezési frekvencia és mód, valamint a blokkméret állíthatók be. A középvonalától lefelé a mágneses tér érzékelésével kapcsolatos beállítások tehetők meg, úgymint mintavételezési frekvencia és mód, valamint a blokkméret állíthatók be. A mellette levő diagramban a mágnesestér-érzékelő szenzor (továbbiakban TM-szenzor) által adott jelek jeleníthetők meg. Az AE- és TM-szenzorokhoz státuszjelzők is találhatóak, melyek jelzik, ha valami probléma merül fel valamelyik csatornán, ugyanis ebben az esetben adatok nem kerülnek mentésre és a mérést meg kell ismételni. Mivel a rendszer többcsatornás, így lehetőség van az egyes csatornák adatait egyenként megjeleníteni, ehhez elegendő egy kis pipát tenni a megjelenítendő csatornához tartozó jelölőnégyzetek valamelyikébe. Legalul láthatjuk a státuszjelzőt a mentés állapotára vonatkozóan.

A mérési eredmények kiértékelésében szerzett tapasztalatainkat összegezve kifejlesztettük és létrehoztuk a *Magneto View* elnevezésű többcsatornás utófeldolgozó alkalmazást (5. ábra).

5. ábra. A *Magneto View*-alkalmazás kezelőfelülete



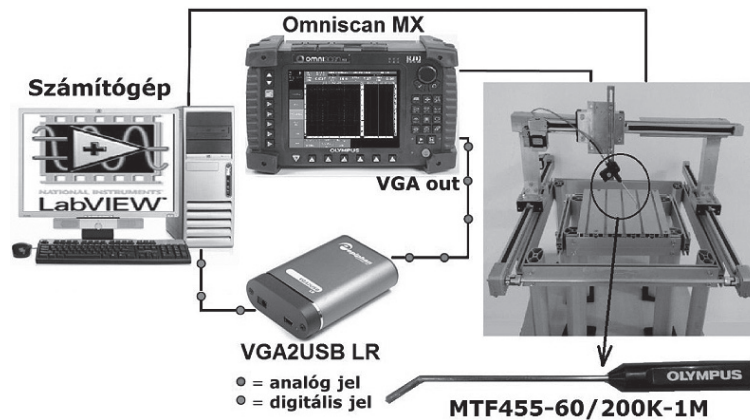
Ebben a szoftverben a felhasználó a mérési adatfájl könyvtárának megadását, valamint a mintavételezési frekvencia és mérési időtartam megadását követően betöltheti a mérési adatokat, információt kap a mentett adatblokkok hibamentességéről, külön kapcsolhatja az egyes csatornák eredményeinek megjelenítését az idő függvényében az alsó diagramban, valamint kiszámolhatja és megjelenítheti az egyes csatornák RMS-értékeit és azok spektrumát egyetlen gombnyomással.

Kifejlesztettünk és létrehoztunk egy *pásztázó örvényáramos vizsgálorendszert*, mely szoftver által vezérelve, az előbeállítások szerint, képes a vizsgálófej egy X-Y koordinátákkal meghatározott terület feletti mozgatására a meghatározott lépésközzel, képes az adatok begyűjtésére, feldolgozására és 2D/3D-ben történő megjelenítésére a beépített különböző képjavító módszerek segítségével.

Az X-Y irányú mozgatószerkezetet ISEL-elemekből építettük meg, a mozgatást léptetőmotorok végzik. A vezérlése ProNC-programmal történik, amelyben beállításra kerülnek főként a vizsgálati terület koordinátái és a lépésköz, ami a felbontást is meghatározza.

A vizsgálófejből érkező adatokat OmniScan MX berendezés fogadja, melynek analóg VGA kimenetéről digitalizáljuk és továbbítjuk a jeleket a számítógép által feldolgozható formában. A berendezés sematikus ábráját a 6. *ábra* szemlélteti.

6. *ábra*. A kifejlesztett pásztázó örvényáramos berendezés

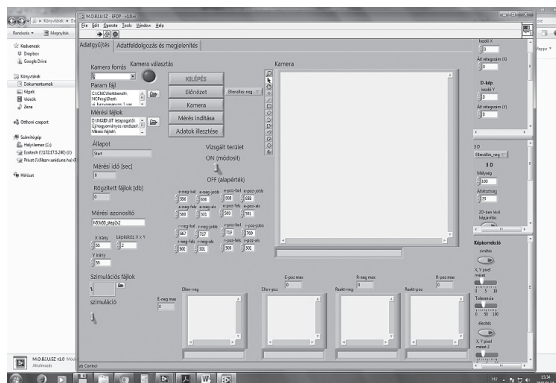


Az adatok gyűjtésére és feldolgozására létrehoztuk a M.O.B.I.U.S.Z nevű, saját fejlesztésű alkalmazásunkat, mely USB-n keresztül képes fogadni a vizsgálófejtől érkező digitalizált adatokat. Képes az adatok meghatározott mappába történő folyamatos mentésére, a mérés készülségi állapotának, a mérés idejének és a rögzített fájlok számának kijelzésére, megjeleníti a fő beállításokat (a vizsgálati terület nagyságát X-Y koordinátákkal, valamint a lépésközt) és a kamera képén az OmniScan MX műszer kijelzőjén látottak megjelenítésére. A szoftver adatgyűjtő alkalmazásának kezelőfelületét a 7. *ábra*, az adatfeldolgozó alkalmazásának kezelőfelületét pedig a 8. *ábra* mutatja.

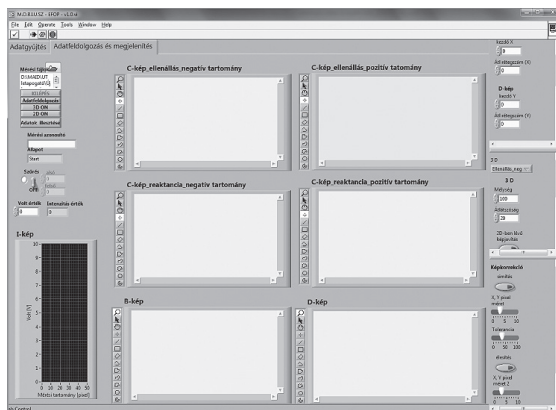
Az adatfeldolgozó alkalmazás képes az adatok utólagos feldolgozására a mérési fájl megnyitását követően. A jobb oldalon beállíthatjuk a különböző 2D-s képekhez tartozó kezdő koordinátákat, valamint a

rétegszámot, majd ezek után a megjelenő képeket kiértékelhetjük. A program képes 3D blokkokba rendezni a begyűjtött adatokat, így realizstikus 3D-s modell hozható létre, ami jól szemlélteti az indikációkat.

7. ábra. M.O.B.I.U.SZ adatgyűjtő alkalmazás

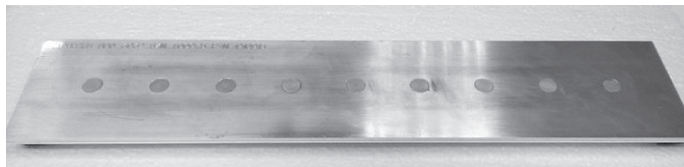


8. ábra. A M.O.B.I.U.S.Z adatfeldolgozó alkalmazás

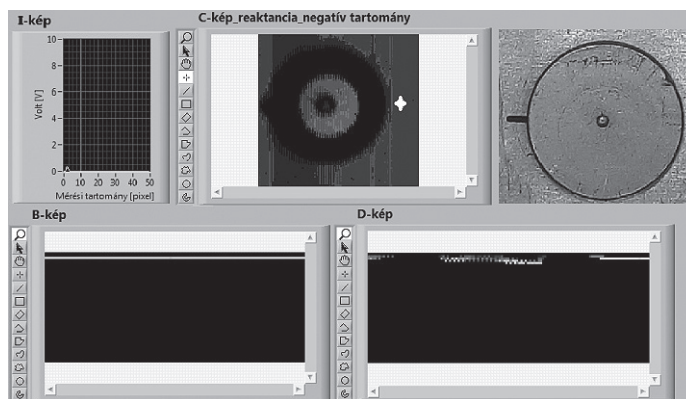


A 9. ábrán az Olympus SPO-3932 etalonon végzett pásztázó örvényáramos vizsgálati eredményt szemlélteti. A szegecskötésű etalon különböző jellegű és mértékű műhibákat tartalmaz, melyek közül egyet mutatunk be. A szegecsfej alatt üreg található, valamint egy folytonossági hiány.

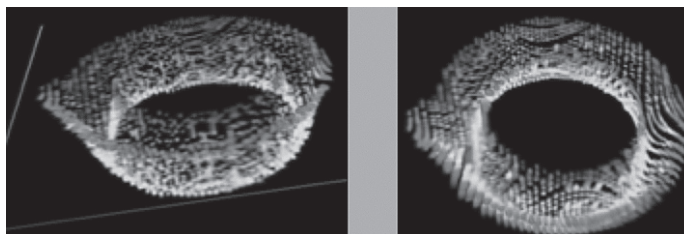
9.a. ábra. Olympus SPO-3932 etalon



9.b. ábra. Felső sorban jobbra: a szegecs nagyított képe, középen: a C-kép negatív reaktancia tartományban



9.c. ábra. A vizsgálati eredmény 3D-s modellje: a szegecsfej alatti üreg és kiterjedése a folytonossági hiánnyal

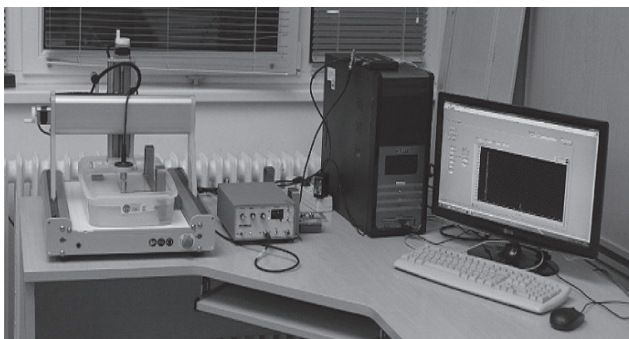


Az üreg a C-kép negatív tartományú reaktancia képen fekete körgyűrűként jelenik meg, a 3D-s modellen pedig a kiterjedése látható. A szegecs és lemez anyaga a C-képen látható, a 3D-s modellen ez nem jelenik meg. Míg a folytonossági hiány a C-képen baloldalon jelenik meg egy kis fekete kitüremkedés formájában, a 3D-s modellen is felfedezhető ugyancsak egy kitüremkedés formájában és látható a kiterjedése is. (E témában egy gépészmérnöki MSc diplomamunka is született: Agócs Mihály: *3D örvényáramos berendezés ipari felhasználásának előkészítése* címmel.)

Kifejlesztettünk és megépítettünk egy *pásztázó ultrahangos vizsgálórendszert*, melynek vezérlőszoftverét LabView környezetben írtuk meg. A vizsgálórendszer fő részei: a háromtengelyű mozgató szerkezet léptetőmotorokkal, az ultrahang hullámokat gerjesztő pulzer, egy PicoScope, melyek az ultrahangos jelek nagysebességű mintavételezésére szolgál, egy számítógép, mely tartalmazza a Mach3-alkalmazást a mozgatószerkezet vezérléséhez, valamint a saját fejlesztésű adatgyűjtő-adatfeldolgozó szoftverünket, melyet MaidScan névre kereszteltünk. Az alkalmazás fejlesztése a kezelő személy által elvégzett kísérleti mérések visszajelzései alapján folyamatosan történik, ilyenek például a hibajavítások, a különböző funkciókkal történő bővítés, mely a kezelhetőséget, funkcionalitást és a megjelenítés minőségét javítja. Létrehoztuk a legújabb programváltozatot, mely moduláris felépítésű, így egyszerűbbé vált a későbbi igények szerinti egyes bővítmények integrálása. Megvalósult a LabView- és Mach3- vezérlőprogram összekapcsolása is, mely hatására LabView felületről képesek vagyunk a vizsgálófej mozgatását elvégezni és különböző egyéb utasításokat végrehajtani. Jelenleg fejlesztői tesztek vannak folyamatban.

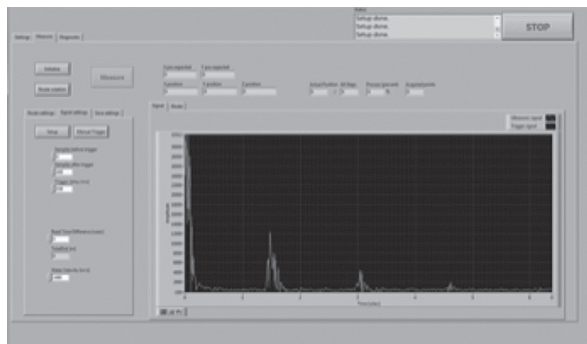
A 10. ábra a vizsgálórendszert, a 11. ábra a MaidScan alkalmazás kezelőfelületét szemlélteti.

**10. ábra.** Az új pásztázó ultrahangos vizsgálórendszer



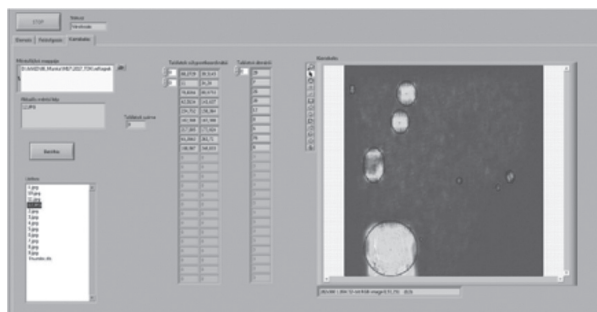


**11. ábra. A MaidScan-alkalmazás kezelőfelülete**



A korábbi pásztázó ultrahangos vizsgálórendszerünkhöz két újabb modul került kifejlesztésre. Az egyik az automatizált objektumdetektáló-modul (12. ábra), mely képes a begyűjtött adatok betöltése után az eredmények megjelenítésére és a talált objektumok súlykoordinátáinak, valamint a találatok méretének meghatározására.

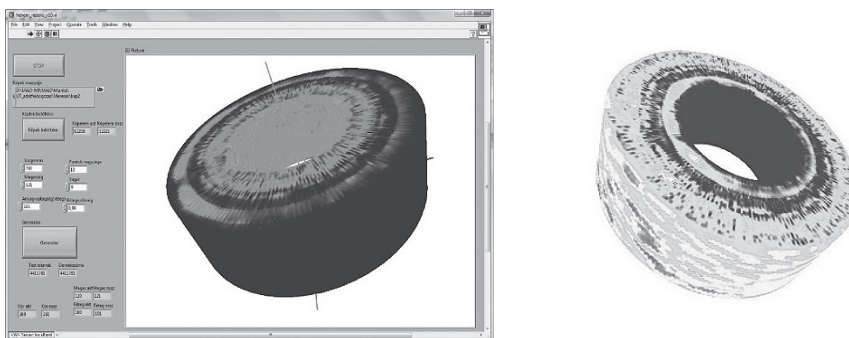
**12. ábra. Objektumdetektáló modul kezelőfelülete**



A modult egy korábbi hallgatónk Reményi Szilárd fejlesztette ki és írt belőle TDK-dolgozatot „Grafikus hibadetektáló és kiértékelő alkalmazás LabView fejlesztői környezetben” címmel.

A másik modul a pásztázóobjektum-megjelenítő rendszer (13. ábra), mely hengeres minták vizsgálatára készült. A program a begyűjtött adatokat egy 3D-mátrixba rendezi és objektumként megjeleníti azt. Az így létrejött realiztikus modell szemléletes formában mutatja meg a felhasználónak a talált indikációkat, ezzel a jelenségek könnyebb értelmezhetőségét segíti elő nemcsak az objektum felületén, hanem a belsejében is rétegről rétegre.

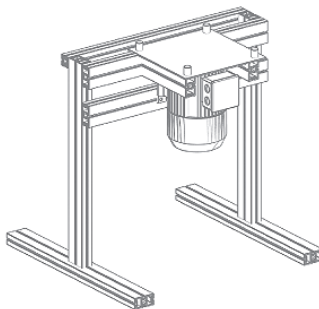
13. ábra. Pásztázóobjektum-megjelenítő rendszer kezelőfelülete



## Gépészeti fejlesztések

A magnetoakusztikus vizsgálórendszerhez megtervezésre és megvalósításra került egy vizsgálóállvány, mely integrált mintatartóval rendelkezik, alkalmas az átalakított villanymotorral keltett forgó mágneses térrel végzendő vizsgálatokra, valamint forgató mechanizmusra szerelt neodímium mágnessel, illetve kézi járommágnessel gerjesztett mágneses mezővel végzendő vizsgálatokra egyaránt. Az állvány merev és stabil kivitelű, melynek 3D-modelljét a 14. ábra szemlélteti. A villanymotor felett egy 300x300 mm-es lemez-minta látható a négy sarkán elhelyezett akusztikus emissziós szenzorokkal.

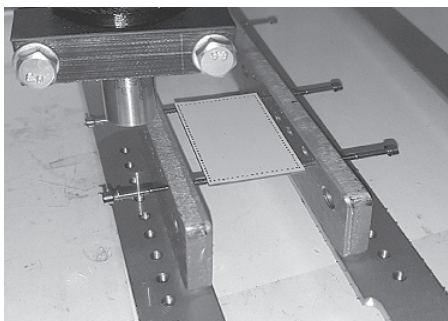
14. ábra. Vizsgálóállvány



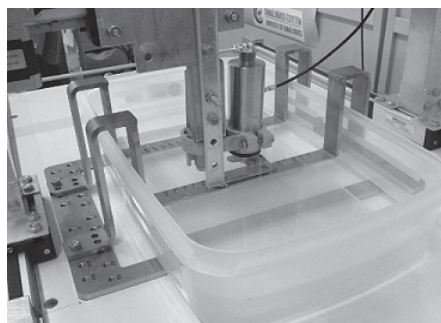
Az ultrahangos vizsgálatok eredményeinek megfelelőségéhez elengedhetetlen a vizsgált minta stabil megfogása, rögzítése. A minták általában szabálytalan alakúak, különböző geometriai méretekkel rendelkeznek, vastagságuk a 1,5 mm-től a több 10 mm-es méretig változhat, így nehéz pontosan és stabilan rögzíteni őket. További szempont, hogy az ultrahangos vizsgálatokat folyadék alatt kell elvégezni, hogy megfelelő csatolás jöjjön létre, melynek hatására az ultrahang az anyagba hatol, így a megfogó szerkezetnek korrózióállónak kell lennie, hogy ne szennyezze el a keletkezett korróziós termék a vizsgálófolyadékot.

E szempontok alapján kifejlesztettünk egy olyan univerzális befogószerkezetet, melyet alkalmas egyrészt a kisméretű, lemezszerű minták befogására a lemezvastagság felőli (oldalról) történő stabil megfogásra (15.a. ábra), másrészt alkalmas nagyobb méretű minták szintén oldalról történő megfogására, a különböző feltételeinek köszönhetően nagyobb méretű alkatrészek leszorításos módon történő rögzítésére, valamint az alaplemezt medencén kívül elhelyezve az „U” alakú feltéttel (15.b. ábra) alkalmas leszorítással rögzíteni a vizsgálati mintát.

15.a. ábra. Lemezszerű minták befogása



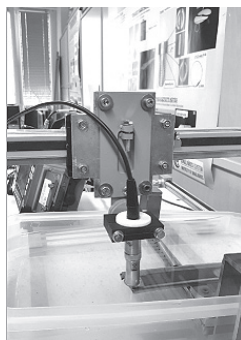
15.b. ábra. Alkatrész leszorításos rögzítése



A korábbi pásztázó ultrahangos vizsgálóberendezésünk a vizsgálófej X-Y irányú mozgatására volt képes. Mivel a vizsgálófej Z irányú mozgása nem állítható, így állandó probléma volt a vizsgált minta vízszintbe állítása és a vizsgálófej függőlegesbe állítása, hogy merőleges legyen a vizsgált felületre.

A probléma megoldására kifejlesztettünk egy olyan ultrahangos vizsgálófej-befogó, -mozgató szerkezetet, mely kézi működtetéssel képes a vizsgálófej Z irányú mozgatására, a pozíció rögzítésére, valamint képes a szögeltérések kompenzálására a merőlegestől számított  $\pm 5^\circ$ -ban, ezzel biztosítva a fej merőleges helyzetének beállíthatóságát. A vizsgálófej-befogó eredetileg az 50 MHz-es vizsgálófejünkhöz készült, de adapterek megtervezésével és legyártásával alkalmassá tettük kisebb méretű ultrahangos fejek befogására is. A szerkezet a 16. ábrán látható.

16. ábra. Vizsgálófej befogó és Z irányú mozgató szerkezet szögeltérés kompenzációval



A berendezéseinkhez több vizsgálófej-befogót és adaptert terveztünk és készítettünk a munka hatékonyságának javítása érdekében. Megvalósítottuk az új pásztázó ultrahangos berendezésünk medencéjének automatikus töltését, ürítését, mely a vizsgálat megkezdése előtt automatikusan feltölti a medencét folyadékkal és a vizsgálat végén kiüríti azt egy tartályba. A funkció megvalósítása a vizsgálófej esetleges beázás elleni védelmét szolgálja.

## Magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel elért vizsgálati eredmények

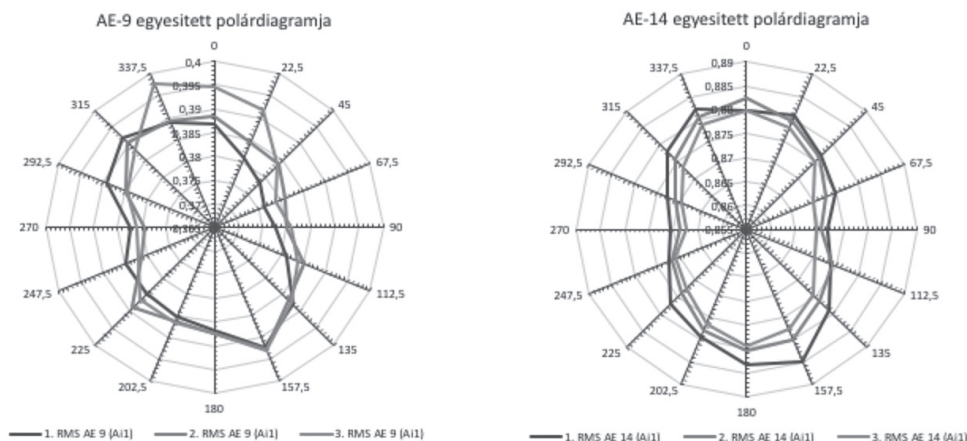
*Anizotrópia* kimutatására végzett vizsgálataink célja annak megállapítása, hogy magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel meghatározható-e az acéllemez anizotrópiája. Vizsgálatainkat 0,775 mm és 3 mm vastagságú acéllemez-mintákon végeztük el, kézi járommágneses gerjesztéssel. A mintaelőkészítésnél figyelni kellett arra, hogy a járommágnes által keltett rezonancia ne keltsen mechanikai zajokat. A lemez minta és a tartóállvány közé szilikongumi korongokat helyeztünk, valamint a járommágnes pólusait is elláttuk egy vékony gumiréteggel. Fontos az AE-szenzorok pozíciója az alátámasztásokhoz képest, mert utóbbi jelentős csillapító hatást fejt ki a doménmozgásból eredő hanghullámok terjedésére, csökkenti az intenzitásukat. A mágneses teret Hall-szenzorral (TM-szenzorral) érzékeltük.

Mivel vizsgálatainkat hidegen hengerelt lemezmintán végezzük így tudjuk, hogy előállításánál során jelentős mértékű mechanikai feszültségváltozáson ment keresztül, így tartalmaz maradó feszültséget. Ha a lemezt mágnesesen gerjesztjük, a 180°-os doménfalak mozgásából adódóan Barkhausen-zaj keletkezik. Mechanikai feszültséget Barkhausen-zajjal ferromágneses anyagokban lehet mérni, melyek magnetostrikciót

mutatnak. Vizsgálataink során a lemezre korábban felrajzolt mérési irányok megegyeznek a járommágnese irányított gerjesztő terével, így, ha a metszéspontban körbe forgatjuk, meghatározhatjuk a mágneses Barkhausen-zaj irány szerinti eloszlását. Abban az esetben, ha az alakításból származó feszültség iránya egybeesik a vizsgálati iránnyal, a zaj megnövekszik, így az alakítás iránya meghatározható.

Az AE szenzorok által adott adatokat kiértékeljük és polárdiagramban ábrázoltuk. A 17. ábrán a 9-es számú AE szenzor, míg a 18. ábrán a 14-es AE-szenzor egyesített polárdiagramja látható 0,775 mm és 3mm vastagságú lemezmintában, melyet három egymást követő mérésből állítottunk össze.

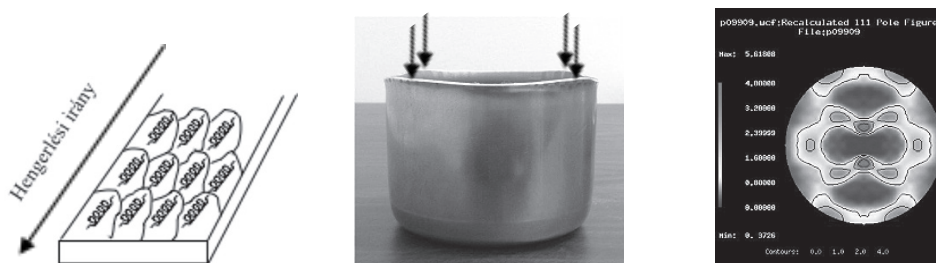
17. ábra. Anizotrópia a 0,775 mm vastag lemezmintában    18. ábra. Anizotrópia a 3 mm vastag lemezmintában



## Alumíniumlemezek textúravizsgálata magnetoakusztikus vizsgálati módszer alkalmazásával

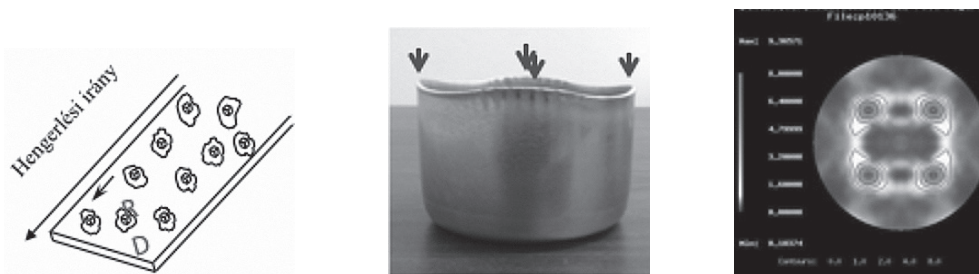
A vizsgálatok célja annak megállapítása, hogy magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel meghatározható-e az alumíniumlemez textúrája, azaz mérhető-e az izotróp-anizotróp anyagok közötti különbség. A textúrát a mélyhúzóhatósági mutatók (fülesedés vizsgálatok alapján) és az anizotrópiai tulajdonságok jellemzik. Hengerelt alumíniumlemezre az erősen alakított textúra jellemző, ahol a szemcsék az alakítás irányában erősen orientáltak, amit a húzott csésze az alakítás irányára 45°-os szögben (45°–45°) megjelenő kismértékű fülesedése is mutat.

19. ábra. Erősen alakított textúra



A textúrák változnak a hőkezelés során. Ha a szemcsék elhelyezkedése random, azaz nincs kitüntetett irányultságuk, akkor az ilyen lemezek tulajdonsága és alakváltozó képessége közel azonos minden irányban. Hőkezelt lemez esetében a kockatextúra kialakulása a domináns, melyet többnyire a húzott csésze az alakítás irányában, illetve arra  $90^\circ$ -os szögben ( $0^\circ$ – $90^\circ$ ) megjelenő fülesedése jellemez, aminek mértéke erősen függ a vizsgált alumíniumötvözet fajtájától.

20. ábra. Kockatextúra



A csészehúzó vizsgálatokkal megállapítható a különböző alakítási/kockatextúrák aránya, ami befolyásolja a fülek elhelyezkedését az alakítás irányával megegyező, vagy arra merőleges irányban, azaz  $0$ – $90^\circ$  vagy  $45$ – $45^\circ$ -ban. Így ezen mérések segítségével egy átfogó képet lehet kapni arra vonatkozóan, hogyan alakulnak a fülesedési-mutatószámok, azaz az izotróp-anizotróp átalakulások hogyan mennek végbe és mely textúrák az uralkodók az egyes technológiai lépések után. Ezek a változások nagymértékben függenek az ötvözetek fajtájától és az egyes ötvözőelemek mennyiségétől.

A magnetoakusztikus módszerrel történő vizsgálatok esetében, a fent leírt kristályszerkezeti változások az akusztikus emissziós szenzor által mért jel RMS-értékeinek megnövekedése és a polárdiagram megnyúlása várható a hőkezeletlen lemez minta esetében a  $45^\circ$ – $225^\circ$ , illetve a  $135^\circ$ – $315^\circ$  (azaz a  $45^\circ$ – $45^\circ$ ) irányokban, valamint hőkezelt lemez minta esetében a  $0^\circ$ – $180^\circ$ , illetve a  $90^\circ$ – $270^\circ$  (azaz a  $0^\circ$ – $90^\circ$ ) irányokban.

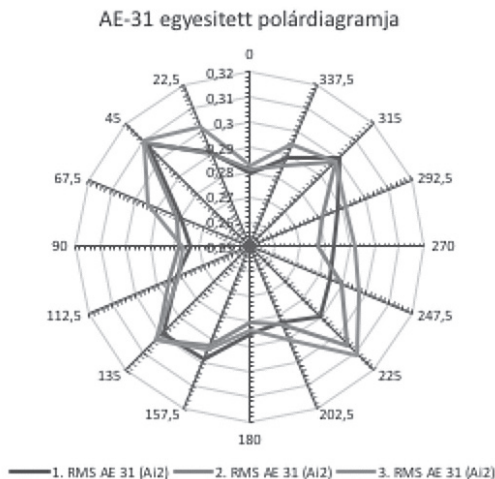
Az alumíniumlemezek textúravizsgálatához sikerült több mintát is beszereznünk. Vizsgáltunk ötvözetlen hőkezeletlen és hőkezelt, valamint ötvözött hőkezeletlen és hőkezelt lemezmintákat, majd megvizsgáltuk a mikroszerkezetüket és mindkét típusra (kemény és lágy) megmérettük csészehúzó vizsgálattal a fülesedési-értékeket.

Az alakított mikroszervezet lényegesen eltér a lágyított lemez mikroszerkezetétől, ezért feltételezhető, hogy a textúrákban is van különbség. Lágyítás hatására végbemegy az újrakristályosodás, azaz az erősen nyújtott szemcsékből egy gömbölyűhöz hasonló szemcsealakzat jön létre.

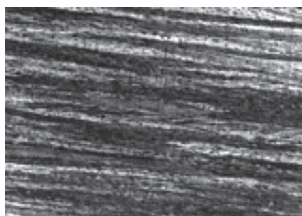
Minden lemeztípuson végeztünk ismétlő méréseket az eredmények reprodukálhatósága miatt és megállapításainkat, következtetéseinket ezek alapján vontuk le.

A 21. és 22. ábrákon bemutatjuk az ötvözetlen hőkezeletlen alumíniumlemez magnetoakusztikus vizsgálati módszerrel kimutatott textúráját, valamint a minta szemcseszerkezetét. A 23. és 24. ábrákon az ötvözetlen hőkezelt alumíniumlemez textúrája és szemcseszerkezete kerül bemutatásra.

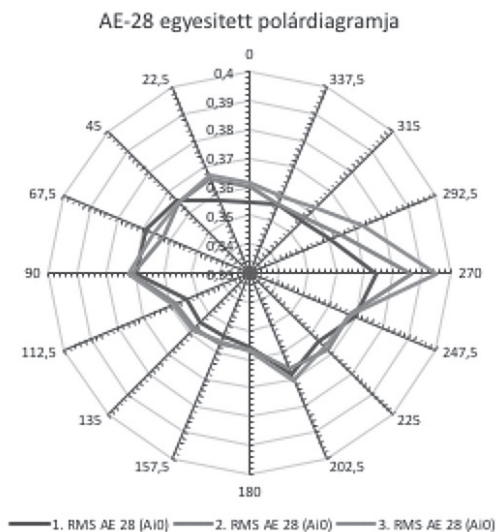
**21. ábra.** Az ötvözetlen, hőkezeletlen alumíniumlemez textúrája magnetoakusztikus módszerrel, a 31-es AE-szenzor eredményei alapján



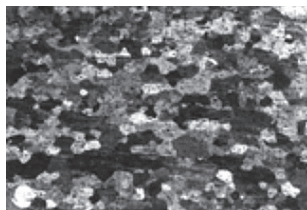
22. ábra. A hőkezeletlen minta szemcseszerkezete 100x-os nagyításban



23. ábra. Az ötvözetlen, hőkezelt alumíniumlemez textúrája magnetoakusztikus módszerrel, a 28-as AE-szenzor eredményei alapján



24. ábra. A lágított minta szemcseszerkezete 100x-os nagyításban





A magnetoakusztikus vizsgálati eredményeket Erichsen-típusú csészehúzó mélyhúzhatósági vizsgálat-  
tal validáltuk. Elvégeztük a vizsgálatokat az ötvözetlen, lágyalumínium-lemez mintán az alábbi eredmé-  
nyel:

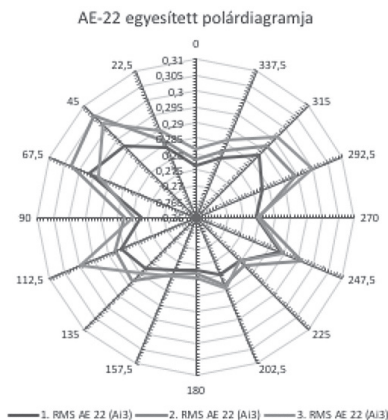
fül % = 2

25. ábra. Kihúzott csésze a lágyított mintából

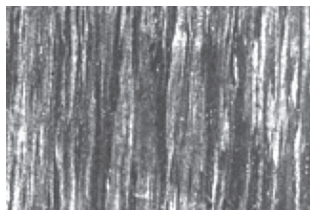


A 25. ábrán jól látható a fülek elhelyezkedése a hengerlési iránnyal párhuzamosan és arra merőlegesen,  
azaz  $0^\circ$ – $90^\circ$  -ban. Ez azt mutatja, hogy ennél az ötvözetnél lágy állapotban a kocka textúra a domináns.  
A 26. és 27. ábrákon bemutatjuk az ötvözött hőkezeletlen alumíniumlemez textúráját, valamint a minta  
szemcseszervezetét. A 28. és 29. ábrákon az ötvözött hőkezelt alumíniumlemez textúrája és szemcseszerve-  
kezete kerül bemutatásra.

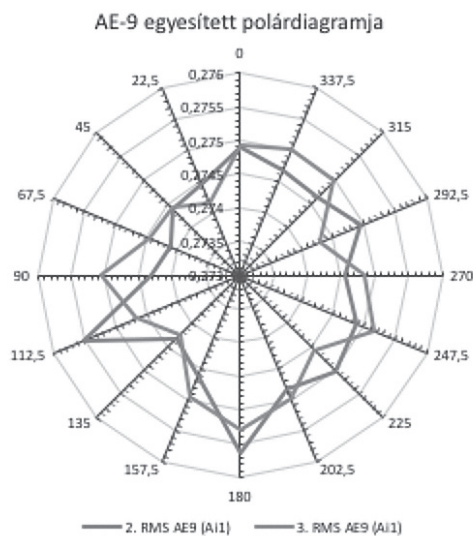
26. ábra. Az ötvözött hőkezeletlen alumíniumlemez textúrája



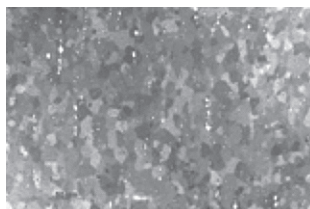
27. ábra. A hőkezeletlen minta szemcseszerkezete 100x-os nagyításban



28. ábra. Az ötvözött hőkezelt alumíniumlemez minta textúrája



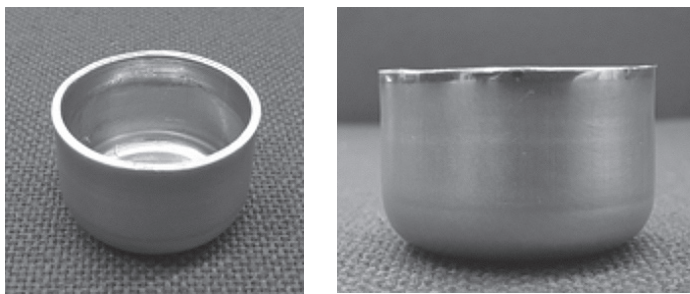
29. ábra. A hőkezelt minta szemcseszerkezete 200x-os nagyításban



Az alakítás irányában erősen nyújtott kristályszerkezet lágyítás után újra kristályosodott, s a szemcsék a nyújtott alakból átalakultak közel equiaxiális formába, egyenletes méretben és elrendezésben. A magas Mg-tartalom miatt az újrakristályosodott szemcsenagyság kicsi, sokkal kisebb, mint az ötvözetlen lágy alumíniumlemez esetében.

Elvégeztük a validáló méréseket is Erichsen csészehúzó-vizsgálattal. A fülérték 1,2%, a fülek iránya  $45^{\circ}$ – $45^{\circ}$  ami a 30. ábrán látható.

30. ábra. A lágyított lemezmintából húzott csésze

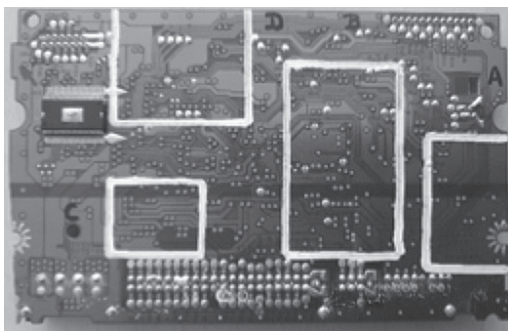


Ebből a mérésből az látszik, hogy ennek az ötvözetnek a textúrája lágyítás hatására kocka textúrába alakult át. Összeségében megállapíthatjuk, hogy a magnetoakusztikus mérések alkalmasak az alumínium ötvözetekben lágyítás hatására végbemenő szerkezetváltozások és az ezzel járó textúrák kimutatására.

### Egyrétegű NYÁKlemez delaminációs vizsgálata

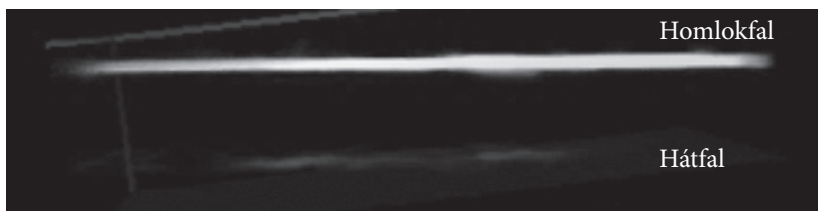
A pásztázó ultrahangos berendezésünket kipróbáltuk külső hőhatásnak kitett NYÁKlemezben kialakult delamináció kimutathatóságának vizsgálatára. Vizsgálatainkat az „A” területen végeztük el. Célunk annak megállapítása, hogy a hőkezelés során kialakul-e és ha igen, akkor mekkora területen alakul ki delamináció.

**31. ábra.** A NYÁKlemezen kijelölt vizsgálati területek

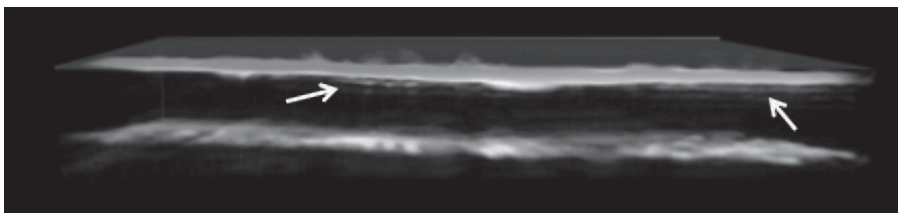


A NYÁKlemez mérete 140x88 mm, lemezvastagsága 1,5mm. Az „A” területet 0,1x0,1mm-es felbontással vizsgáltuk hőkezelés előtt, amikor is nem találtunk gyártási hibára utaló reflexiót. Ezt a 32. ábrán látható 3D-s képen jól megfigyelhetjük, ahol a homlokfal és hátfal között nincs indikáció. A 33. ábrán a hőkezelés utáni állapot látható.

**32. ábra.** Az „A” terület hőkezelés előtti állapota 0,1x0,1mm-es felbontásban

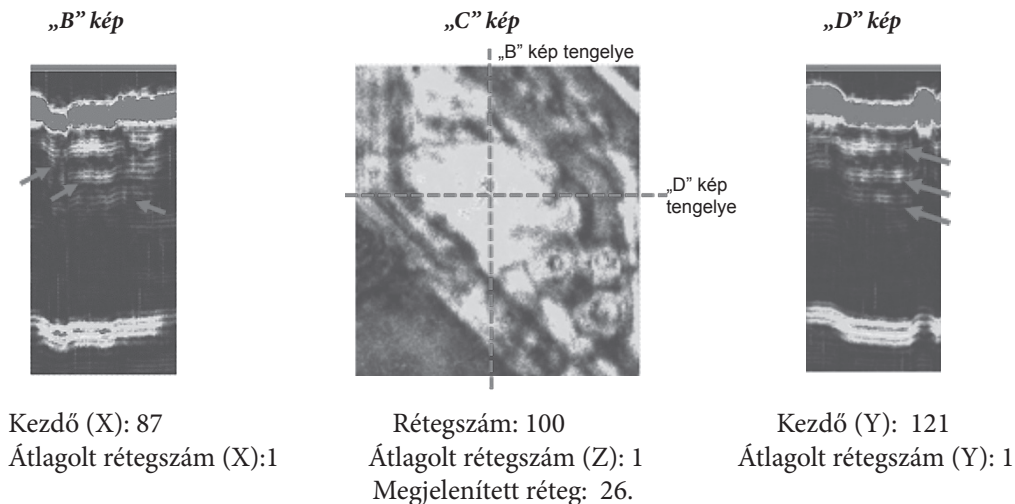


**33. ábra.** Indikációk megjelenése hőkezelés után az „A” terület alatt a lemez belsejében 0,1x0,1mm-es felbontásban

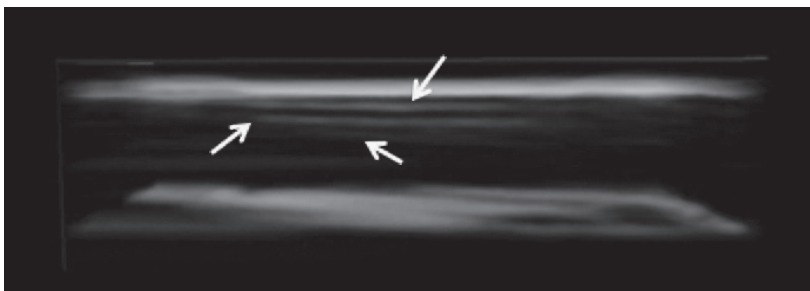


A felbontást 0,05x0,05mm-re megnövelve és a vizsgálati területet szűkítve további részletek mutat-  
hatók ki az indikációk kiterjedéséről és mélységéről, ahogy azt a 34. ábra szemlélteti. A 35. ábrán a 3D-s  
modell látható.

34. ábra. Az indikáció kiterjedése és mélysége



35. ábra. Indikációk a NYÁKlemez belsejében 0,05x0,05mm-es felbontásban



A vizsgálatok folyamatban vannak, de összességében megállapíthatjuk, hogy képesek vagyunk kimu-  
tatni egyrétegű NYÁKlemez delaminációs hibáit.

## Összefoglalás

### 3/A. MAGNETOAKUSZTIKUS RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK FEJLESZTÉSE

- Létrehoztuk a magnetoakusztikus vizsgálóberendezést, adatgyűjtő-, adatfeldolgozó szoftverét, mellyel képesek vagyunk forgó mágneses mezőben lemezmintákat vizsgálni és akusztikus emissziót detektálni.
- Képesek vagyunk anizotrópiát kimutatni hengerelt acéllemezekben.
- Vékony lemezek hegesztési varrataiban keletkező anyagfolytonossági hiányainak vizsgálata során sikerült különbségeket kimutatni „jó” és „rossz” minősítésű varratok között.
- A módszert a MAID Lab-ban, laboratóriumi vizsgálatok végzésére tervezzük bevezetni, amelyet anizotrópia kimutatására alkalmazott más elven működő vizsgálati módszer validálására is alkalmazhatunk.
- Új kutatási irány, alumíniumlemezek textúravizsgálata: az eredmények alapján képesek vagyunk ötvözetlen és ötvözött alumíniumlemez textúráját kimutatni, de további vizsgálatokat végzünk, hogy melyek azok az ötvözetek, amelyeken a magnetoakusztikus módszer sikeresen alkalmazható.

### 3/B. PÁSZTÁZÓ RONCSOLÁSMENTES VIZSGÁLATI MÓDSZEREK TOVÁBBFEJLESZTÉSE LABVIEW PROGRAMOZÁSSAL

#### *Pásztázó örvényáramos vizsgálatok:*

- Elkészült a pásztázó örvényáramos berendezés, melyet a vezérlőszoftver megfelelően működtet.
- A pásztázó próbák sikeresen lezajlottak, a vizsgálatok és az eredmények reprodukálhatók.
- Képesek vagyunk kimutatni hegesztési varratokban keletkezett repedéseket.
- Méréseket végzünk hegesztési varratok belső zárványainak kimutatására.

#### *Pásztázó ultrahangos vizsgálatok:*

- Elkészült a pásztázó ultrahangos vizsgálófejjel felszerelt akusztikus mikroszkóp prototípusa. Megtörtént a vezérlőszoftver kifejlesztése, tesztelése, hibáinak kijavítása és az első próbavizsgálatok.

Célunk, a berendezés kezelésének, a vizsgálatok végzésének, az eredmények kiértékelésének és a program felépítésének egyszerűsítése.

- Az új pásztázó akusztikus mikroszkóp képes fémfelületek közötti „légrés” kimutatására 50 MHz-es vizsgálófejjel, bevonattal ellátott fémlemez vizsgálatára (makrodelamináció), valamint mikrochip belső struktúrájának megjelenítésére.

*LabView-család integrálása:*

- A LabView-család sikeresen integrálódott a szoftverfejlesztésbe. Minden általunk kifejlesztett vezérlő-, adatfeldolgozó- és vizuális megjelenítő szoftver ebben a környezetben került programozásra.

*Köszönetnyilvánítás*

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta.





## Vízparti növények nehézfém-akkumulációjának meghatározása a dunai üledékekben

**Összefoglalást:** A talajok, a folyóvízi és ipari iszapok toxikus elem-tartalmának csökkentésére, visszanyerésére, a területek remediálására napjainkban már többfajta kémiai, fizikai és biológiai módszer ismert. A biológiai módszerek egyike a fitoremediáció, amely során különféle növényfajokat/fajtákat alkalmazunk azért, hogy az elszennyeződött talajokban, folyóvízi üledékekben határérték alá csökkentsük a toxikus összetevők mennyiségét. Sokféle fitoremediációs folyamat ismert, úgymint a fito-extrakció, fito-volatilizáció, fito-filtráció, fito-stabilizáció, fito-degradáció. Kutatásaink során fő célunk az volt, hogy megállapítsuk a dunai iszapon gyökerező vízinnövények nehézfém-akkumulációs képességét, fitoextrakciós potenciálját. A folyóvízi környezetben élő növények közül feketéllő farkasfog (*Bidens frondosa* L.), vízi mentát (*Mentha aquatica* L.), vízi hídört (*Alisma plantago-aquatica* L.), réti lósóskát (*Rumex obtusifolius* L.), baracklevelű keserűfűt (*Persicaria maculosa* L.), és parti sást (*Carex riparia* L.) választottunk ki teszt növényként. Eredményeink alapján megállapítható, hogy a vizsgált növényfajok közül a réti lósóskában halmozódott fel a legtöbb króm, réz és cink, míg a vízi menta akkumulálta legjobb hatékonysággal az ólmot, és a nikkelt.

**Kulcsszavak:** Iszapos üledék; fitoextrakció; nehézfém; akkumuláció; bioremediáció.

**Abstract:** It is well known that several chemical, physical and biological methods are known for the reduction and recovery of the potential toxic elements of soils, river sediments and industrial sludges. One of the biological methods is phytoremediation, in which various plant species/varieties are used in order to reduce the concentration of toxic components in contaminated soils/sludges or river sediments. Many types of phytoremediation processes are used, such as phytoextraction, phytovolatilization, phytofiltration, phytosta-

\* Dunaiújvárosi Egyetem  
E-mail: kovacsbe@uniduna.hu

\*\* Dunaiújvárosi Egyetem  
E-mail: kisse@uniduna.hu

[1] Erdei László (2015): Fito(bio)remediáció. Szeged: JATEPress.

bilization and phytodegradation. The main aim of our research was to determine the heavy metal accumulation capacity and phytoextraction potential of aquatic plants rooted in the Danube sediment. Among the plants devil's beggartick (*Bidens frondosa* L.), water mint (*Mentha aquatica* L.), European water-plantain (*Alisma plantago-aquatica* L.), parella (*Rumex obtusifolius* L.), bistort (*Persicaria maculos* L.) and riparian sedges (*Carex riparia* L.) were selected as test plants. Based on our results, it can be concluded that most of chromium, copper and zinc accumulated in parella, while water mint accumulated lead and nickel with the best efficiency.

**Keywords:** Muddy sediment; phytoextraction; heavy metals; accumulation; bioremediation.

## Bevezetés

A Duna Európa és hazánk egyik legnagyobb folyója, amely fontos ipari, logisztikai és turisztikai értékkel bír, mindamelllett ártereivel és holtágaival jelentős ökológiai értéket is képvisel. Az elmúlt évtizedek intenzív ipari és kommunális szennyezése azonban a vízminőségére kedvezőtlen hatást gyakorolt. Ennek következtében a vizes területek üledékében mind szerves (pl. fehérjék, zsírok, növényvédő szerek, kőolaj származékok), mind szervetlen (pl. nehézfémek, oldott sók, nitrogén- és foszforvegyületek) szennyezőanyagok rakódtak le. Utóbbi szennyezők között a legnagyobb környezeti kockázattal a nehézfémek bírnak. Nehézfémeknek általában az  $5 \text{ g/cm}^3$ -nél nagyobb sűrűségű fémeket és ötvözeteket szokták nevezni. Ilyen fémek például a higany, a kadmium, az ólom, vagy a nikkel és a króm. Ezek erősen mérgezőek, sok enzimre gátló hatásúak. A nehézfémek között számos olyan ún. esszenciális elem is található (réz, cink), amelyek kis koncentrációban a növények fejlődésére jótékony hatást gyakorolnak, de feldúsulásuk esetén a növényekben toxikus tüneteket okozhatnak [1]. A nehézfémek legnagyobb veszélye abban rejlik, hogy képesek felhalmozódni a táplálékláncban. Az élő szervezetben ezután kifejtik mutagén, karcinogén, vagy toxikus hatásukat, különféle megbetegedéseket okozva.

A folyóvízi iszapok, vagy talajok szennyezettségének csökkentésére napjainkban többféle remediációs módszer ismert. A *remediálás* egy terület megjavítását, meggyógyítását, jelenti, a latin *remedium* = gyógyszer, orvosság, orvoslás kifejezés alapján. A remediáció az a tevékenység, amikor a talajt vagy az iszapokban találha-

tó szennyező anyagok mennyiségét határérték alá csökkentjük. Egy terület remediálását végezhetjük a helyszínen in-situ, és a helyszíntől eltérő helyen ex-situ módon [2].

A kémiai és fizikai módszerek nagy előnye, hogy gyorsak és hatékonyak, hátrányuk viszont, hogy többnyire nagyon költségesek. Főként a pontszerű vagy tudatos, ipari eredetű szennyeződések eltávolítására alkalmazzuk őket [1]. A legfontosabb kémiai-fizikai módszerek közé tartozik például a talajlevegőztetés, a talajmosás (extrakció), a stabilizálási/szilárdítási módszerek, az elszigetelés. Ezek kombinálhatók a termikus eljárásokkal [3, 4]

Ha a szennyezés diffúz, vagy nagyobb kiterjedésű, akkor inkább a bioremediációt alkalmazzák. A bioremediációnak két fajtája ismert.

Az egyik, amikor a talajban lévő, vagy oda bejuttatott mikroorganizmusokat alkalmazzák a szennyezők megkötésére, eltávolítására. A másikonál a nagy, hatékony potenciállal rendelkező növényfajok/fajták fitoremediációs képességét használják fel.

A fitoremediáció in-situ biológiai kezelési technológia. Ilyenkor a szerves vagy szervetlen szennyező anyagok eltávolítása, átalakítása vagy megkötése növények segítségével történik. A folyamat végén betakarított növényeket ellenőrzött körülmények között tovább kezelik. A fémekkel szennyezett biomassza tömeget komposztálással lehet csökkenteni, ilyenkor a szennyezett biomasszát visszajuttatják mikroelemekben szegény talajokba. Másik megoldás, hogy a biomasszát elégetik. A keletkezett hamut vagy veszélyeshulladéklerakókban deponálják, vagy – ha az egyes összetevő koncentrációja elég nagy – ez a hamuból visszanyerhető.

A fitoremediációs módszerek előnyei: környezetbarát, nem terheljük a környezetet veszélyes anyagokkal (pl. oldószerek), kisebb költségeket jelent, továbbá az eljárás végén a növényi anyag elégetése után visszamaradt hamuból egyes szennyező anyagok (pl. nikkkel) visszanyerhetőek. Hátrányai, hogy időigényes folyamat, továbbá a növények nem vesznek fel, vagy nem bontanak le egyes összetevőket, valamint az eljárás során a növényeket gondozni kell (tápanyagokkal, vízzel kell őket ellátni) [1, 2, 5].

A fitoremediáció a szennyezőanyag és az elérendő cél szempontjából lehet: fitostabilizáció, fitodegradáció, fitoextrakció, rizofiltráció [3].

[2] Perei Katalin–Pernyeszi Tímea–Lakatos Gyula (2013): *Bioremediáció*. Szegedi Tudományegyetem–Debreceni Tudományegyetem–Pécsi Tudományegyetem. ([https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011\\_0025\\_kor\\_4/ch01.html](https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011_0025_kor_4/ch01.html))

[3] Gruiz Katalin: *Talajremediáció. – A természetes szennyezőanyag-csökkenési folyamatok felhasználására és intenzifikálására alkalmas technológiák áttekintése*. ([https://enfo.hu/sites/default/files/NA%C3%A9sremedgruiz\\_0.pdf](https://enfo.hu/sites/default/files/NA%C3%A9sremedgruiz_0.pdf))

[4] Papp Zoltán (1997): *A talaj és védelme*. Győr: Széchenyi István Főiskola. ([http://www.sze.hu/~radicsa/TALAJVEDELEM/TALAJVEDELEM\\_1.pdf](http://www.sze.hu/~radicsa/TALAJVEDELEM/TALAJVEDELEM_1.pdf))

[5] Simon László (2004): *Fitoremediáció*. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318. Budapest: BMKE–OMIKK. Pp. 1–59.

[3] Gruiz Katalin: *Talajremediáció. – A természetes szennyezőanyag-csökkenési folyamatok felhasználására és intenzifikálására alkalmas technológiák áttekintése.* ([https://enfo.hu/sites/default/files/NA%C3%A9sremedgruiz\\_0.pdf](https://enfo.hu/sites/default/files/NA%C3%A9sremedgruiz_0.pdf))

[5] Simon László (2004): *Fítoremediáció. Környezetvédelmi Füzetek.* Azonosító: 2318. Budapest: BMKE–OMIKK. Pp. 1–59.

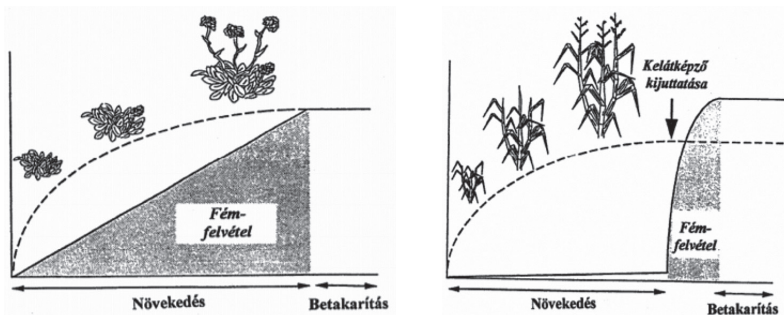
Fitostabilizáció során különböző adalékanyagokkal kezelik a szennyezett közeget, majd pl. toxikus fémeket tűró növényekből álló takaróréteget hoznak rajta létre, amely a fizikai jelenlétével megakadályozza a szennyezőanyag talajba, levegőbe, felszíni, vagy felszín alatti vízbe jutását (csökkenti az eróziót és a kioldást). Ilyenkor nem a szennyező anyag kivonása, elszállítása, hanem annak megkötése, immobilizálása a cél [3], [5].

Fitodegradáció során a növény maga vagy gyökerének mikroflórája teljesen elbontja, mineralizálja, mobilizálja (illékonyvá teszi, pl. higany) vagy csökkent kockázatú anyaggá alakítja a biodegradálható vegyi anyagokat. Szennyezett talaj vagy szennyezett víz (élőgép) kezelésére alkalmazható [3].

Fitoextrakció során magasabb rendű növényeket (pl. gyorsan növő, nagy biomasszát adó fajok, pl. nyárfa, fűzfa) alkalmaznak a toxikus elemekkel szennyezett talajok megtisztítására. Ebben az esetben speciális, a fémek hiperakkumulációjára képes növényekkel vonják ki a nehézfémeket a talajból. Hiperakkumulációról akkor beszélhetünk, ha a fémkoncentráció mértéke a növény adott szervében meghaladja az 1000 mg/kg szárazanyag-értéket. A hiperakkumulátor növényeknél a hajtás/gyökér fémkoncentrációjának aránya (transzlokációs faktor, TF) általában >1. Ilyen, hiperakkumulációra képes európai növényfajok például a ternye (*Alyssum*) és a tarsóka (*Thlaspi*) fajok. A kivonás történhet folyamatos *fitoextrakcióval* (1/a ábra), amely során főként hiperakkumulátor növényfajtákat telepítenek a szennyezett területre, amelyek növekedésük során folyamatosan vonják ki a szennyező anyagokat a talajból, iszapból.

Ezeket elsősorban felső-, hajtás-részeikben halmozzák fel. A fitoextrakció másik fajtája az indukált fitoextrakció, amely során kelátképzők talajba juttatásával teszik a fémeket könnyen felvehetővé nagy biomasszát képező növényfajok számára (1/b ábra). A szennyeződések a folyamat során a talajból, iszapokból a növények felső, föld feletti szerveibe (szárába, levelébe, termésébe), vagy a gyökérzetbe helyeződnek át. A szennyezett biomasszát, mint veszélyes hulladékot ezután ellenőrzött körülmények között feldolgozzák, vagy a szennyezőt égetés után a hamuból visszanyerik [5].

1. ábra. A fitoextrakció fajtái: a. folyamatos fitoextrakció, b. indukált fitoextrakció [5]



Rizofiltráció során a fémeket (pl. ólom), és radionuklidokat a szennyezett vízből növényi gyökerek segítségével távolítják el. Erre elsősorban azok a növényfajok alkalmasak, amelyek nagy gyökértömeggel, gyökérfelülettel rendelkeznek és viszonylag kevés fémet szállítanak át a gyökereik a hajtásba. A növényeknek ezen kívül akár napokig is el kell tudni viselni egyes fémek nagy koncentrációját a vízben. A fémeket, illetve a radionuklidokat a gyökerek megkötik, felhalmozzák vagy kicsapják. A hazai növényfajták közül ilyen eljárásra leginkább alkalmas a napraforgó, amelynek speciális rizofiltrációs rendszere akár 50 g szárazanyagot képez négyzetméterenként, ami 1,5 kg szárazanyag/m<sup>2</sup>-nek felel meg havonta. [6].

A fitovolatilizáció jelentése: fito = növény, volatizáció = illékonyvá tétel. A folyamat során a növények illékonyvá teszik a talajban, üledékben, vízben lévő szennyező anyagokat (pl. szelént, higanyt, arzént). A növényekben lezajló élettani, biokémiai folyamatoknak köszönhetően a higany (Hg) illékony elemi formájává, vagy illékony, kevésbé toxikus metil- vagy dimetil-vegyületté alakul át, hasonlóan, más, toxikus fémekéhez (Se, As). A fenti illékony vegyületek a levegő közvetítésével távolabbra szállíthatók, így a szennyező koncentrációja az adott közegben csökken [5].

[6] Kovács-Bokor Éva–Domokos Endre–Kiss Endre (2019): Folyóvízi üledékek nehézfém-tartalmának akkumuláció vizsgálata növényekkel. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*. Vol. 4. (2.) Pp. 46–53.

[7] Kovács-Bokor Éva (2019): Dunai iszapos üledékek hatása a fehér mustár (*Sinapis alba*) csírázására. In: Petrovickijné Angerer Ildikó–Tóth Tamás–Szántó Krisztina–Tóth László (Szerk.): *Tájékoztató Duna-újváros Megyei Jogú Város környezeti állapotáról*. Duna-újváros: Dunaújváros Megyei Jogú Város Önkormányzata. Pp. 109–117.

## Célkitűzések

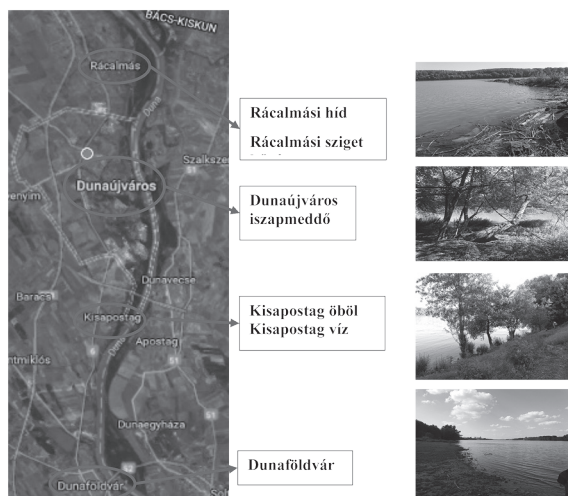
A kapcsolódó szakirodalmak áttanulmányozása után elsőként a célterületet jelöltük ki, ahonnan be tudtuk gyűjteni a kutatásunk fókuszát jelentő folyóvízi iszapokat és az azokban gyökerező növényfajokat.

Kutatásunk során egyik célunk volt a dunai iszapos üledékek toxikusságának és nehézfém-tartalmának meghatározása a folyó dunaújvárosi szakaszán, valamint a kapott fém-koncentrációk összehasonlítása a 6/2009 (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet a földtani közeg és a felszín alatti víz szennyezéssel szembeni védelméhez szükséges határértékekről és a szennyezések méréséről adott mellékletében található határértékekkel. További célunk volt a kijelölt mintavételi területeken olyan növényfajok keresése, amelyek fitoextrakciós potenciálja megfelelő az üledékben lévő fémszennyezések csökkentésére. Ezen kívül vizsgálataink kiterjedtek a nehézfémek növényen belüli akkumulációs helyének (gyökér, szár, levél, virág) meghatározására is. A kapott eredményekből kiszámítottuk a nehézfémek üledékből történő bioakkumulációs és transzlokációs factorszámait is annak érdekében, hogy kiválaszthassuk, hogy az ilyen jellegű szennyezettséggel rendelkező iszapok esetén melyik tesztnövény a legalkalmasabb a fitoremediációra.

## Mintavételi helyszínek bemutatása

Mintavételi helyszíneinket a Duna partvonalát követve több városban jelöltük ki Rácalmástól Dunaföldvárig (2. ábra). Rácalmáson két helyről, a Rácalmási híd lábánál és a 2. kőgátnál vettünk üledékmintákat. Dunaújvárosban a 2009-ben, a Szabadstrand iszapjából kialakított iszapmeddőről gyűjtöttük be mintáinkat. Kisapostagon a régi hajóállomás környékén jelöltünk ki négy helyszínt. Dunaföldváron, a Duna partján, a híd feletti, északi részről gyűjtöttük be az üledéket [7].

2. ábra. A mintavételi helyszínek bemutatása



[8] Milinki É. (2013): *Ökotoxikológia és környezetvédelem*. Retrieved from [https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038\\_03\\_milinki\\_hu/ar01s06.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038_03_milinki_hu/ar01s06.html)

[9] Feigl V.–Fekete-Kertész I.–Molnár M. (2014): *Csíránövény gyökér- és szárnövekedés-gátlási teszt*. [http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nytud%C3%A1sok%20laborleirat\\_2014.pdf](http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nytud%C3%A1sok%20laborleirat_2014.pdf)

## Anyag és módszer

### a. Csíránövény-teszt bemutatása az iszapok toxikusságának meghatározására

A csíránövény-tesztek során a csírázó magvak érzékenységét használják fel szennyezett vizek, vagy veszélyes hulladékok elhelyezhetőségének megítélésénél. A teszt előnye, hogy a vizsgálathoz felhasználható magok könnyen tárolhatók és az év folyamán bármikor beszerezhetők [8]. Több szárazföldi növényfaj/fajta is alkalmas talaj, üledék és vízminták környezet toxikológiai vizsgálatára. A közös ezekben a növényekben, hogy csírázásuk és növekedésük gátolt, ha toxikus anyaggal kerülnek kapcsolatba. A toxikus hatás a csírázóképeség gátlása vagy a gyökér- és szárhosszak mérése alapján becsülhető meg. Erre alkalmazható tesztnövény például a kerti zsáza, a fehér mustár és a közönséges búza [9].

A csíránövény-teszt során leggyakrabban fehér mustármagot (*Sinapis alba*) alkalmaznak. Ez a növény a szennyezőanyagok széles skálájára érzékeny, ezért számos

[7] Kovács-Bokor Éva (2019): Dunai iszapos üledékek hatása a fehér mustár (*Sinapis alba*) csírázására. In: Petrovickijné Angerer Ildikó–Tóth Tamás–Szántó Krisztina–Tóth László (Szerk.): *Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város környezeti állapotáról*. Dunaújváros: Dunaújváros Megyei Jogú Város Önkormányzata. Pp. 109–117.

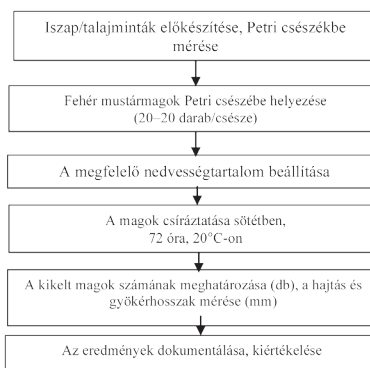
[8] Milinki É. (2013): *Ökotoxikológia és környezetvédelem*. Retrieved from [https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038\\_03\\_milinki\\_hu/ar01s06.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038_03_milinki_hu/ar01s06.html)

[9] Feigl V.–Fekete-Kertész I.–Molnár M. (2014): *Csíránövény gyökér- és szárnövekedés-gátlási teszt*. [http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nyek%20laborleirat\\_2014.pdf](http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nyek%20laborleirat_2014.pdf)

ökotoxikológiai tesztnél alkalmazható [8]. A fehér mustár a káposztafélék vagy más néven keresztesvirágúak (*Brassicaceae*) családjába tartozik. Egynyári, elágazó szárú növény, lomblevelei 10 cm hosszúak, nyelesek és karélyosak, sárga virágai bogernyőben állnak. Toktermése 4 cm hosszú. A növény magjai aprók (kb. 1 mm-esek), gömbölyűek, sárgák vagy világosbarnák; az ízük enyhén csípős [9].

A csíránövény-teszt pontos leírását az MSZ 21 976-17: 1993 szabvány tartalmazza. A folyóvízi üledékeket a teszt előtt előkezeltük, azaz szárítottuk és porítottuk. A bennük található szerves részeket (gyökerek, vízi élőlények vázai) eltávolítottuk. A megfelelő nedvességtartalom beállítása és a magok bekerülése után a csíráztatás 20°C hőmérsékleten, sötétben történt meg 72 órán keresztül. A teszt végén a magok csíráztatását figyeljük meg, megszámoltuk a kicsírázott magok számát (db), illetve megmértük a hajtás és gyökérhosszakat (mm). A teszt lépéseit az 3. ábra mutatja be [7].

3. ábra. A csíránövény teszt lépései



## Mintavételi módszer

A mintavételek során a folyóvízi üledékeket a Duna partjáról gyűjtöttük be, az iszapréteg felső 0–10 cm felső rétegből vettünk 5–5 db mintát, a kijelölt terület: 1 m<sup>2</sup> volt minden helyszínen. A tesztnövények esetén helyszínenként 5–5 mintát gyűjtöttük be 1 m<sup>2</sup> területről.



## Vizsgált növényfajok

A négy mintavételi helyről az alábbi vízparti növényeket gyűjtöttük be, mint teszt-növényt:



Vízi hídőr  
(*Alisma plantago-aquatica*);



Vízi menta  
(*Mentha aquatica*);



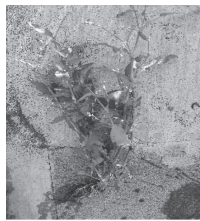
Feketéllő farkasfog  
(*Bidens frondosa*)



Parti sás  
(*Carex riparia L.*);



Réti lószóka  
(*Rumex obtusifolius L.*),



Baracklevelű keserűfű  
(*Persicaria maculosa L.*)

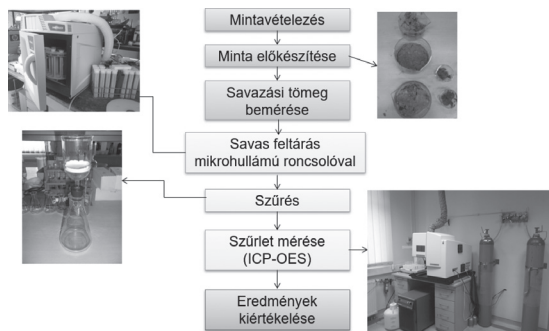
## Nehézfém-tartalom feltárása iszapokból

Az üledékek nehézfém-tartalmát MSZ 12739/4-78 szabvány szerinti, salétromsavas hidrogén-peroxidos feltárással határoztuk meg (4. ábra). Ennek során a tömegállandóságig szárított üledékmintákat rotációs bepárlóban (Heidolph Laborota 400) és mikrohullámú roncsolóban (CEM Mars 6) tártuk fel tömény salétromsavval (65%) és hidrogén-peroxiddal (35%), majd szűrés után a kapott szűrlet nehézfém-tartalmát atom-abszorpciós spektrométerrel (AAS, Perkin Elmer AAnalyst 400) és indukált plazma optikai emissziós spektrométerrel (ICP-OES, Perkin Elmer Avio 500) mértük meg [6].

[6] Kovács-Bokor Éva–Domokos Endre–Kiss Endre (2019): Folyóvízi üledékek nehézfém-tartalmának akkumuláció vizsgálata növényekkel. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*. Vol. 4. (2.) Pp. 46–53.

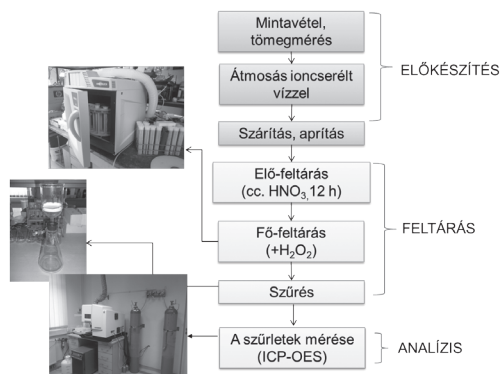
[6] Kovács-Bokor Éva–Domokos Endre–Kiss Endre (2019): Folyóvízi üledékek nehézfém-tartalmának akkumuláció vizsgálata növényekkel. *International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS)*. Vol. 4. (2.) Pp. 46–53.

4. ábra. A savas feltárás menete folyóvízi üledékek esetén



A növények nehézfém-tartalmának mérése előtt a begyűjtött növénymintákat feldaraboltuk. Főbb részeik szerint elkülönítettük a gyökerüket, szárukat, levelüket, virágukat (5. ábra). A növényi részeket ezután kiszárítottuk és felaprítottuk, majd tömény salétromsavval, és hidrogén-peroxiddal kezeltük. A mikrohullámú roncsolóban történő feltárás után a kapott szűrletek nehézfém-tartalmát szintén AAS és ICP-OES-készülékben mértük meg [6].

5. ábra. A savas feltárás menete növényminták esetén



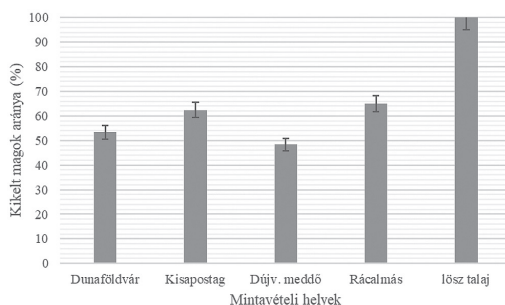
A kapott mérési eredmények kiértékelésénél az iszapos üledékmintákat a „6/2009. (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet mellékletének határértékeihez hasonlítottuk. A növéyminták nehézfém-tartalmát a a kapcsolódó szakirodalomban szereplő átlagértékekhez viszonyítottuk [5.] [9].

## Kutatási eredmények bemutatása

### 1. Csíranövény-tesztek eredményei [7]

A csíranövény-teszt során minden üledékminta esetén három sorozatot készítettünk el, és ezek átlagértékei alapján értékeltük ki a kapott eredményeket. Elsőként a kikelt magok számát határoztuk meg, majd kiszámítottuk ezek arányát az elvetett magok számához viszonyítva (6. ábra). A kapott eredmények alapján elmondható, hogy az elvetett magok 48–73%-ban csíráztak ki. A dunaiújvárosi iszapmeddőről és a Dunaföldvárról gyűjtött üledékmintákon a csírázási képesség kisebb volt. A legjobb csírázási eredményeket a Rácalmásról és Kisapostagról gyűjtött minták mutatták. Átlagosan elmondható, hogy az elvetett magok több, mint 57%-a kicsírázott.

6. ábra. A kikelt magok számának aránya az elvetett magok számához viszonyítva



A 7. ábrán a kicsírázott fehér mustármagok átlagos hajtás- és gyökérhosszúságát (mm) mutatjuk be mintavételi helyszínenként.

[5] Simon László (2004): *Fitoreme-diáció*. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318. Budapest: BMKE OMIKK. Pp. 1–59. ISBN:963 593 429 0, ISSN 0866-6091

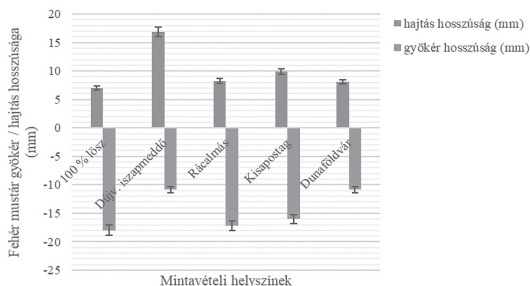
[7] Kovács-Bokor Éva (2019): Dunai iszapos üledékek hatása a fehér mustár (*Sinapis alba*) csírázására. In: Petrovickijné Angerer Ildikó–Tóth Tamás–Szántó Krisztina–Tóth László (Szerk.): *Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város környezeti állapotáról*. Dunaújváros: Dunaújváros Megyei Jogú Város Önkormányzata. Pp. 109–117.

[9] Feigl V.–Fekete-Kertész I.–Molnár M. (2014): *Csíranövény gyökér- és szárnövekedésgátlási teszt*. [http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nygyógyászati%20laborleirat\\_2014.pdf](http://enfo.agt.bme.hu/drupal/sites/default/files/N%C3%B6v%C3%A9nygyógyászati%20laborleirat_2014.pdf)

[5] Simon László (2004): *Fitoremediáció. Környezetvédelmi Füzetek*. Azonosító: 2318. Budapest: BMKE OMIKK. Pp. 1–59. ISBN:963 593 429 0, ISSN 0866-6091

[10] Szegedi László (2011): *Toxikus nehézfém-szennyezés utóhatásának vizsgálata barna erdőtalajon*. (Doktori (PhD) értekezés) Gödöllő: SZIE.

7. ábra. A magok átlagos gyöker- és hajtáshosszúságai (mm)



Összegzésként megállapítottuk, hogy a négy mérőhely üledékmintáin az elvetett magok átlagosan 57%-osan csíráztak ki. Ha ezt összehasonlítjuk a kontroll-mintaként használt lósztalaj 100%-os csírázásával, akkor megállapítható, hogy az üledékben található szennyező anyagok gátolták a fehér mustármagok csíráképességét.

A kicsírázott fehér mustármagok gyöker- és hajtáshosszait vizsgálva megállapítottuk, hogy a magok átlagos hajtáshosszai nagyobbak voltak, mint a kontrollé. Tehát itt serkentő hatást érzékeltünk. Ezzel szemben az üledékminták átlagos gyökérhosszai kisebbek voltak, mint a kontroll eredmények. Tehát az üledékmintákban található szennyezőanyagok gátló hatása inkább a gyökérszét fejlődésére volt hatással.

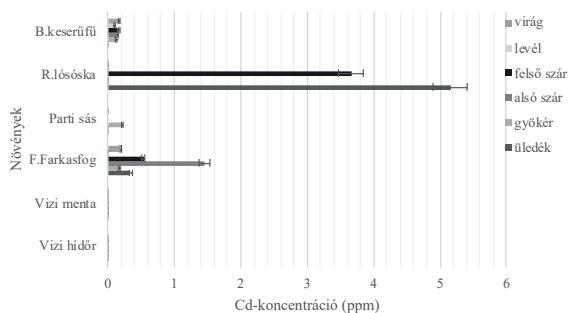
## 2. AZ ISZAPOK ÉS NÖVÉNYEK NEHÉZFÉM-TARTALMÁNAK ELEMZÉSE

### a. Iszap és növényminták átlagos kadmium tartalma

A 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben meghatározott határérték kadmiumra 1 ppm. Ezt az értéket csak a lószka alatti üledékminta kadmiumtartalma haladta meg (8. ábra). A többi tesztnövény alól vett üledékmintában határérték alatti kadmium-koncentráció volt mérhető.

A növények közül a feketéllő farkasfog, lószka és keserűfű fő részeiből volt e szennyező a kimutatható. A kadmium a növények szárában dúsult fel legnagyobb mértékben. A farkasfog és lószka szárrészeiben mért koncentrációk meghaladták az ajánlott értéket (0,5 ppm) [5], [10].

8. ábra. Iszap- és növényminták átlagos kadmiumtartalma

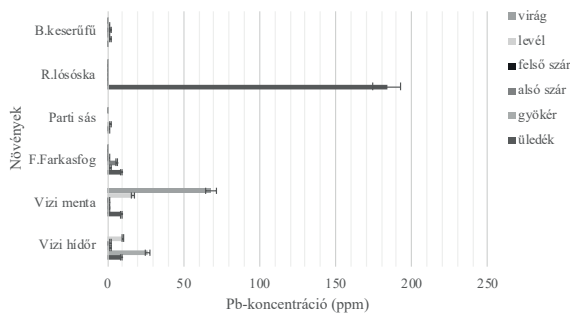


### b. Ólomtartalom

A réti lósóska üledékét kivéve a többi tesztnövény alatti iszapban mért ólomkoncentrációk a 6/2009 (IV. 14.) KvVM-EüM-FVM együttes rendelet határértéke (100 ppm) alatt maradtak (9. ábra).

A növényekben mérhető ólomkoncentráció ajánlott határértéke 30–300 ppm [5], [10]. A mért adatok a maximális értéket nem közelítették meg. A legnagyobb ólomkoncentrációk a vízi menta leveléből és virágjából, a vízi hídör gyökérzetéből volt kimutatható. A farkasfog, a sás és a keserűfű kevésbé volt képes akkumulálni ezt az elemet.

9. ábra. Iszap- és növényminták átlagos ólomtartalma



[5] Simon László (2004): *Fitoremediáció*. Környezetvédelmi Füzetek. Azonosító: 2318. Budapest: BMKE OMIKK. Pp. 1–59. ISBN:963 593 429 0, ISSN 0866-6091

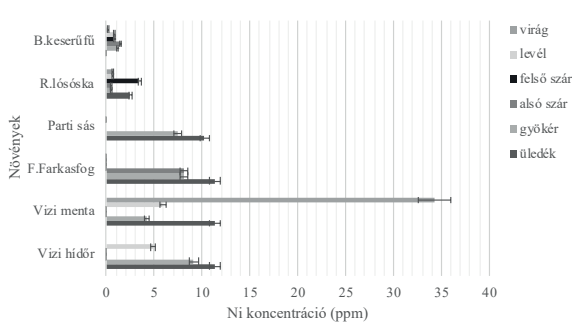
[10] Szegedi László (2011): *Toxikus nehézfém-szennyezés utóhatásának vizsgálata barna erdőtalajon*. (Doktori (PhD) értekezés) Gödöllő: SZIE.

### c. Iszap- és növényminták átlagos nikkeltartalma

Az üledékek nikkeltartalma nem haladta meg a 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben előírt határértéket (40 ppm). A parti sás, a farkasfog, a vízi menta és a vízi hídör üledékében mért nikkeltartalom közel megegyezett, a réti lósóska és a keserűfű alatti üledék nikkeltartalma fele ekkora volt (10. ábra).

A vizsgált növények részeiben mért nikkel koncentráció többnyire nem haladta meg a tűréshatárt (10–100 ppm) [5], [10]. A növények közül legnagyobb mértékben a vízi hídör, a vízi menta és a feketéllő farkasfog tudta a nikkelt akkumulálni. A maximális nikkeltartalom a menta virágjából volt kimutatható (77%). A parti sás csak a gyökérzetében tudta ezt az elemet felhalmozni, a leveléből nem volt kimutatható. A réti lósóska és a keserűfű esetén a nikkel a növény minden részében megtalálható volt.

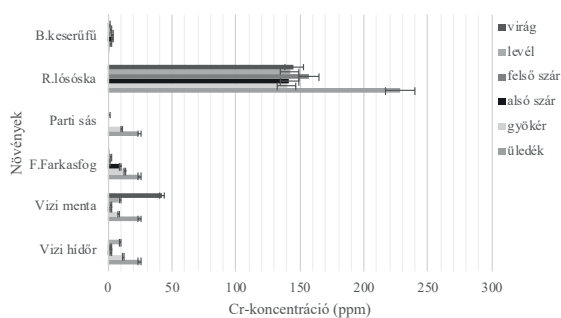
10. ábra. Iszap- és növényminták átlagos nikkeltartalma



### d. Összkróm-tartalom

Az üledékekben mért krómkoncentrációk csak a lósóska esetében haladták meg a 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben előírt határértéket (75 ppm). A növényekben mért összkróm mennyisége többszörösen túllépte a növények számára tolerálható 1–10 ppm értéket (11. ábra) [5], [10]. A teszt növények közül legnagyobb mértékben a réti lósóska akkumulálta a krómot. Ez az összetevő az egész növényben egyenletesen halmozódott fel, 19–21%-os volt a megoszlás aránya a lósóska részei között.

11. ábra. Iszap- és növényminták átlagos órsszkrómtartalma

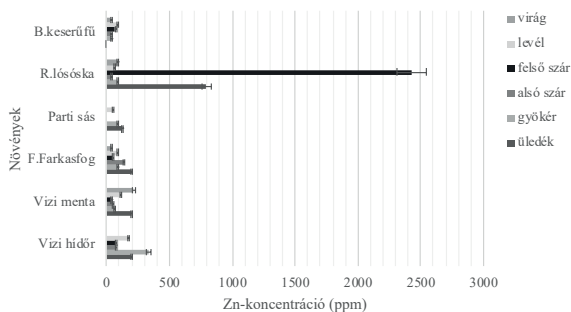


#### e. Cinktartalom

Az üledékmintákból kimutatott cinktartalom csak a lósóska esetén haladta meg a 6/2009 (IV. 14.) KvVM–EüM–FVM együttes rendeletben előírt határértéket (200 ppm).

A növények számára tolerálható értéket (250 ppm) a mért értékek csak a réti lósókában lépték túl (12. ábra) [5], [10]. A cink, mint könnyen felvehető, esszenciális elem a teszt növényeken belül minden növényi részben akkumulálódott. Míg a vízi hídör és a parti sás esetében inkább a gyökérzetben halmozódott fel, a többi növényfaj esetében a felsőbb növényi részekből volt nagyobb arányban kimutatható.

12. ábra. Iszap- és növényminták átlagos cinktartalma



[11] Baker, A. J. M.–Brooks, R. R. (1989): Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 1: Pp. 81–126.

[12] Lago-Vila, M.–Arenas-Lago, D.–Rodríguez-Sejjo, A.–Andrade Couce, M. L.–Vega, F. A. (2015): Cobalt, chromium and nickel contents in soils and plants from a serpentinite quarry. *Solid Earth*. 6. Pp. 323–335.

### 3. A TESZTNÖVÉNYEK FITOEXTRAKCIÓS POTENCIÁLJÁNAK FAKTORSZÁMÍTÁSAI

#### 1. BAF= Bioakkumulációs faktor

A bioakkumulációs faktor a növény föld feletti hajtásaiban (szár + levél + virág) és a folyóvízi üledékben található nehézfém-tartalom aránya [11], [12].

$$BAF = C_{\text{hajtás}} / C_{\text{üledék}}$$

#### 1. táblázat. A tesztnövények BAF-értékei

	BAF faktor					
	Vízi hídör	Vízi menta	F. farkasfog	P. sás	R. lósóska	B. keserűfű
<b>Cd</b>	-	-	-			
<b>Cr</b>	0.484	2.135	0.465	0.023	2.560	-
<b>Pb</b>	1.303	9.290	0.670	0.000	0.000	-
<b>Ni</b>	0.432	3.545	0.720	0.000	2.051	-
<b>Zn</b>	1.635	2.095	1.539	0.363	3.285	-

A hat tesztnövény közül a legtöbb elemre a vízi menta BAF-értékei lettek a legnagyobbak (1. táblázat).

Általában elmondható, hogy a hiperakkumulátor-növények részeiben feldúsult összetevőkre nézve a BAF > 1.

#### 2. TF=Transzlokációs faktor

A transzlokációs faktor a növény föld feletti hajtásában (szár + levél + virág) és a növény gyökerében mért nehézfém-koncentráció aránya [11], [12].

$$TF = C_{\text{hajtás}} / C_{\text{gyökér}}$$



2. táblázat. A teszt növények TF-értékei

	TF faktor					
	Vízi hídór	Vízi menta	F. farkasfog	P. sás	R. lósóska	B. keserűfű
<b>Cd</b>	-	0.000	12.254	0.000	-	4.192
<b>Cr</b>	1.043	6.964	0.861	0.054	4.195	4.514
<b>Pb</b>	0.457	103.528	5.934	0.000	-	1.732
<b>Ni</b>	0.535	9.537	1.011	0.000	10.731	2.719
<b>Zn</b>	0.966	6.689	3.342	0.554	30.112	5.325

A hat teszt növény közül a vízi hídór és a parti sás TF-értékei lettek a legkisebbek a vizsgált összetevőket nézve. A többi növényfaj hatékonyan tudta transzlokálni a szennyező anyagokat a gyökérzetéből a felsőbb növényi részek felé (2. táblázat).

Eredményeink alapján megállapítható, hogy a teszt növények közül a kadmium felvételére leginkább alkalmas a feketéllő farkasfog és a baracklevelű keserűfű. Az ólmot a vízi hídór és vízi menta tudta legnagyobb mértékben akkumulálni. A nikkelt felvételére a leginkább alkalmas a vízi hídór, a vízi menta és a feketéllő farkasfog. A réti lósóska volt a legalkalmasabb az öszkróm felhalmozására. A cink felvételében a réti lósóska, és a vízi hídór volt a leghatékonyabb.

A növényi részek és az üledékek nehézfém-tartalma alapján számított BAF-faktorok a vízi menta esetében voltak a legnagyobbak. (Ennél a növényfajnál a számított BAF-értékek >1 voltak.) A vizsgált elemek közül a legtöbbet a vízi menta, a keserűfű és a feketéllő farkasfog tudta transzlokálni a gyökérzetéből a felsőbb növényi részek (levél és virág) felé. A faktorszámítások eredményei szerint a teszt növények közül a vízi menta rendelkezik a legjobb fitoextrakciós potenciállal.

#### Köszönetnyilvánítás

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta.



# *Nagy alakváltozású rugalmas problémák magasabb rendű peridinamikus modellezése*

**Összefoglalás:** A műanyagból készült gépalkatrészek a gyártásuk és működésük során összetett mechanikai terhelésnek vannak kitéve. Ezen terhelések alatt az üregek és repedések képződhetnek és szaporodhatnak az alkatrészekben, csökkentve annak élettartamát. A repedéskeletkezés, -terjedés és -elágazás modellezése nehéz a klasszikus végeelem-modellezésben (FEM). A rugalmas-rideg testek törésmechanikai problémáira az Extended FEM és a háló nélküli módszerek eredményei adnak választ. A képlékeny anyagok és a nagy deformációk problémája még mindig nyitott a további kutatások számára. A felületre szerelt elektronikus eszközök (SMD) gyártásuk, illetve működésük során összetett termomechanikai terheléseknek vannak kitéve. Már a gyártás során is üregek és repedések keletkezhetnek a forrasztott kötésekben, valamint a rideg anyagokból készült alkatrészekben, például kerámia kondenzátorokban. A kezdeti károsodás káros hatással lehet a termék élettartamára. A repedés keletkezésének és terjedésének modellezése – a matematikai függvények szingularitása miatt – a klasszikus végeelem-modellezés során (FEM) nehéz. A probléma leküzdésére kibővített FEM (X-FEM) és háló nélküli módszereket fejlesztettek ki, ennek ellenére a repedések és repedések elágazásának termo-mechanikus modellezése továbbra is nyitott kérdés a kutatás számára. A peridinamikus kontinuum modellezés (PCM) célja a repedéskeletkezés, terjedésének és a törés folyamatának modellezése integrálegyenletek segítségével. Az eredeti bond-based peridinamikában szakadásra képes rugókat képzelünk el a kontinuum összes anyagi pontpárja között, a fejlettebb, állapotalapú peridinamikus modelleznél az anyagi pont környezetének alakváltozása határozza meg a pontra ható erőt. Munkánkban kidolgoztuk a kapcsolt termomechanikai probléma állapotalapú peridinamikai modelljét, és azt alkalmaztuk a repedések keletkezésének és terjedésének detektálására egy nyomtatott áramköri lap (PCB) forrasztást követő hűtése során.

\* *Dunaiújvárosi Egyetem,  
Műszaki Intézet*  
E-mail: ladanyi@uniduna.hu

\*\* *Óbuda University, Budapest*  
E-mail: gonda.viktor@bgk.uni-obuda.hu

A kutatás során az egyik kitűzött célunk egy repedéskeletkezés és terjedés leírására alkalmas megbízható és a korábbiaknál gyorsabb peridinamikusan megoldó létrehozása volt. A csomópontok létrehozása a feladatunk kitűzött egyszerű esettanulmányokban – köszönhetően az egyszerű geometriai kialakításnak – nem járt jelentős időszükséglettel. A későbbiekben, bonyolultabb geometriával rendelkező feladatok esetén itt még felmerülhetnek kérdések.

A peridinamikusan mozgás-, egyensúlyi vagy hővezetési egyenletek nemlokális természetűek, az egy tetszőlegesen kiválasztott anyagi pont gyorsulását/egyensúlyát vagy hőmérsékletét nem csak közvetlen, de véges távolságban lévő környezet is befolyásolja. A csomópontok peridinamikusan kapcsolatain az ezen a távolságon belül elhelyezkedő szomszédokat értjük.

**Kulcsszavak:** Repedéskeletkezés, Extended FEM és a háló nélküli módszerek, termomechanikai terhelések, X-FEM, peridinamikusan kontinuum modellezés, peridinamikusan mozgás.

**Abstract:** Machine components made of plastics are subjected to complex mechanical loads during manufacturing as well as during their service life. Under these loadings, voids and cracks can nucleate and propagate in components and can decrease the lifetime of the product.

Modelling of crack initiation, propagation and branching is difficult in classical finite element analysis (FEM). Nevertheless the quite new results of Extended FEM and meshless methods, for ductile materials and large deformations it is still open for further research.

Surface mounted electronic devices (SMD) are subjected to complex thermo-mechanical loads during manufacturing as well as during their service life. Even during manufacturing, voids and cracks can nucleate in soldered joints and also in components such as capacitors, made of brittle materials. An initial damage can have a detrimental effect on the lifetime of the product. Modelling of crack initiation and propagation is difficult in classical finite element analysis (FEM), due to the singularity of the mathematical functions in the differential analysis. Extended FEM (X-FEM) and meshless methods were developed to overcome these problems, nevertheless thermo-mechanical coupling of cracks and crack branching is still open for further research.

Peridynamic Continuum Modelling (PCM) is dedicated to solve the crack initiation, propagation and fracture by integral equations. In original bond-based peridynamics, tearable springs are defined between all the couples of material points of the continuum, while in a more advanced formulation as a state-based modelling, a force vector is defined as well. In this work, the state based peridynamic model of the coupled thermo-mechanical problem was developed, and applied to detect initiation and propagation of cracks during cooling of a printed circuit board (PCB) after SMD soldering in a wave soldering machine.

One of our goals in the research was to create a reliable and faster peridynamic solver suitable for describing crack formation and propagation. The creation of nodes in the simple case studies set out for the task –

thanks to the simple geometric design – did not require significant time. In the case of later tasks with more complex geometries, questions may still arise here.

Peridynamic equations of motion, equilibrium, or thermal conductivity are nonlocal in nature, and the acceleration / equilibrium or temperature of an arbitrarily selected material point is affected not only by a direct but also by a finite distance environment. Peridynamic connections of nodes are understood to mean neighbors located within this distance.

**Keywords:** Crack initiation, Extended FEM and meshless methods, thermo-mechanical loads, X-FEM, Peridynamic Continuum Modelling, Peridynamic equations.

## Kutatás rövid ismertetése

A szilárd testek mechanikájának és általánosabban a fizika peremérték-feladatainak analitikus és numerikus (pl. végeelem, VEM-módszer) módszerei alkalmasak a mérnöki problémák nagy részének megoldására. Vannak azonban területek, melyeken napjainkig nem sikerült megnyugtató választ adni a felmerült kérdésekre. Ide tartoznak a nem folytonos megoldással rendelkező feladatok, mint pl. a repedés keletkezése és terjedése szilárd testekben. A nemlineáris viselkedésű szerkezetek esetén a felmerülő problémák halmozottan jelentkeznek. Mára világossá vált, hogy a sikertelenség oka kettős: egyrészt a probléma matematikai leírására alkalmazott eszközök – parciális differenciálegyenletek –, másrészt az ezek megoldására használt hagyományos numerikus módszerek – pl. VEM – is alkalmatlanok az ilyen típusú feladatok megoldására. A megjelent publikációk alapján a peridynamikus anyagmodell egyértelműen alkalmas szakadással rendelkező mezők leírására. Az alkalmazási területek köre igen széles: szilárd testek kis alakváltozásainak lineáris és nemlineáris problémái, hőterjedési feladatok, redukált feladatok (lemez/héj és rúdfeladatok), korróziós jelenségek leírása, stb.

Itt is vannak azonban nyitott kérdések és új területek:

- A peridynamikus modell paraméterének (anyag radiusz) optimális megválasztása.
- A peridynamikus pontok helyének hatása a numerikus tulajdonságokra.
- Az erősen nemlineáris feladatok statikus és dinamikus megoldása: nagy alakváltozások.
- Nemlineáris problémák és anyagi károsodás kapcsolása: kisciklusú fáradás.

A kutatás célja, hogy a mechanika nemlineáris peremérték feladatainak megoldására alkalmas – nem folytonos esetben is megbízhatóan működő – módszer kidolgozása. Vizsgáljuk az ún. peridynamikus modell nemlineáris feladatokra történő alkalmazhatóságát és a modell integrálegyenleteit.

## Kutatási előzmények

A kutatás első periódusában tevékenységünket elsősorban a szakirodalomban található eredmények megismerésével és feldolgozásával töltöttük. Ennek során három fő területre koncentráltuk:

1. A szilárd testek nemlineáris mechanikai problémái.
2. A peridinamikus anyagmodellel kapcsolatos eddigi eredmények megismerése.
3. A grafikus kártyák általános célú programozásának megismerése.

Ebben a fejezetben a fenti három terület rövid ismertetésével foglalkozunk.

### A SZILÁRD TEST MECHANIKÁJÁNAK NEMLINEÁRIS PROBLÉMÁI

A szilárd testek mechanikájának célkitűzése, hogy matematikai eszközökkel írja le a testeket érő külső mechanikai hatások (terhelések) és a testek alakváltozásainak (elmozdulások) kapcsolatát. A klasszikus mechanikában ez a leírás általában két módon történhet:

- A test belső pontjaira felírt differenciálegyenletek és a test és környezete közt lejátszódó kölcsönhatást leíró peremfeltételek segítségével történik. Ezt a megközelítést „erős formalizmusnak” nevezzük, mivel a megoldást jelentő függvényekkel kapcsolatban szigorúbb követelményeket – pl. kétszeres folytonos differenciálhatóság – támaszt.
- A test egészére felírt variációs vagy egyéb fizikai egyenlet, mely automatikusan teljesíti az előbb említett peremfeltételeket. Ezt a megközelítést „gyenge formalizmusnak” nevezzük, mivel a megoldást jelentő függvénnyel kapcsolatban „gyengébb” követelményeket – általában elegendő az egyszeres folytonos differenciálhatóság – támaszt.

Bizonyítható, hogy a kétféle formalizmus egyenértékű és egymásba alakítható.

A mechanikai problémák leírása általában a következő mennyiségek közti egyenletek felírásával történik:

- elmozdulás:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{X}, t): (\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}^3, \mathbf{X} \in V$$

- alakváltozási mérték (nyúlás): pl.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot (\boldsymbol{\nabla} \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \boldsymbol{\nabla})$$

- mechanikai feszültség: pl.

$$\boldsymbol{\sigma} = 2 \cdot G \cdot \left( \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{\nu}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \varepsilon_I \cdot \mathbf{E} \right)$$

A peremfeltételek klasszikus leírása általában

- a test peremén lévő pontok elmozdulásainak  $\mathbf{u}(\mathbf{X}) = \hat{\mathbf{u}}(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in S_u$
- vagy felületi terhelésének  $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{X}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{X}) = \mathbf{t}(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in S_\sigma$

előírásával történik. (Megjegyzés: A fenti egyenletek a lineárisan rugalmas anyagú, homogén, izotrop test alakváltozását leíró egyenletek.)

A lineáris problémák közös jellemzője, hogy a külső hatások és az általuk okozott alakváltozások egyenesen arányosak. Matematikai szempontból ez azt jelenti, hogy a folyamatot leíró differenciálegyenletek lineáris típusúak és a peremfeltételek állandónak tekinthetők.

Mérnöki szempontból tekintve, könnyen belátható, hogy nincs olyan fizikai (mechanikai) folyamat, mely megfelelő pontossági igény esetén tökéletesen lineárisnak tekinthető. A lineáris modell a mérnöki feladatok megoldásának egy jól és általában könnyen kezelhető közelítése. Vannak azonban olyan területek, ahol a lineáris viselkedés feltételezése semmiképp sem elfogadható:

- nagy elmozdulások és/vagy alakváltozások,
- nemlineáris anyagi viselkedés,
- nemlineáris peremfeltételek.

A háromféle nemlineáris probléma kombinálódhat és megoldásuk a lineáris problémák megoldásánál sokkal nehezebb. Kutatásunkban az első problémakörre fókuszálunk, de a későbbiekben vizsgálatainkat valószínűleg kiterjesztjük a második kérdéskörre is.

A nemlineáris problémák megfogalmazása után általában két újabb kérdéssel szembesülünk:

1. Milyen módszerrel oldható meg a megfogalmazott peremérték-feladat?
2. Hogy igazolható, hogy a matematikai modell megoldása és a fizikai jelenség „közel van egymáshoz”?

A nemlineáris problémák megoldására általában nem létezik analitikus módszer, így ebből a szempontból a numerikus módszerek jelentősen felértékelődnek. Az alkalmazott matematikai eszköztár egyértelműen meghatározza a definiálható és megoldható fizikai problémák körét, nevezetesen a térben folytonosan változó megoldással rendelkező differenciálegyenleteket.

Az 1950-es évektől kezdődően a mai értelemben vett számítógépek megjelenésével lehetővé vált a matematika numerikus módszereinek alkalmazása e differenciálegyenletek megoldására. Az 1970-es évek közepére tisztázódott a végeselem-módszer matematikai háttere, így az elfogadottá válhatott a mérnöki – és általánosabban a fizikai – feladatok numerikus megoldására.

A számítógépek teljesítményének növekedésével lehetővé vált a bonyolultabb problémák kezelése:

- bonyolult geometriával rendelkező testek,
- nemlineáris problémák: geometriai-, anyagi-, peremfeltételek okozta (érintkezés) problémák,
- dinamikai problémák,
- nem mechanikai problémák megoldása.

Az 1980-es évek közepére világossá vált, hogy a végeelem-módszer – és az azzal konkurens, rendelkezésre álló egyéb módszerek – alkalmatlanok a nem folytonos (szakadós) megoldással rendelkező egyenletek megoldására. A problémát látszólag a közelítő megoldás hálófüggése, illetve a hálógenerálás időigényének jelentős növekedés okozta.

Az 1990-es évek közepén jelentek meg az első hálózást nem igénylő – hálómentes – módszerekről szóló publikációk. Szerzőik beszámoltak a különböző alternatív lehetőségek alkalmazhatóságáról és a felmerült kérdésekről:

- peremfeltételek kezelésének kérdései,
- konvergencia-kérdések,
- a végeelem-módszerhez képesti alacsony sebesség.

#### A PERIDINAMIKUS ANYAGMODELLEL KAPCSOLATOS EDDIGI EREDMÉNYEK MEGISMERÉSE

A hálómentes numerikus módszerek kutatása során kiderült, hogy alkalmazásuk csak részben vagy egyáltalán nem oldja meg a kifejlesztésüket motiváló problémákat. A VEM-nél tapasztalható kovergenciaproblémák kezelhetővé váltak, a repedések keletkezésével és terjedésével kapcsolatban azonban számos kérdés megválaszolatlan maradt. A kérdések háttérben mélyebb, kontinuum- (KM) és törésmechanikai (TM) problémák állnak:

- A repedéscsúcs környezetében az elmozdulásmező parciális differenciálhányadosai nem értelmezhetőek, így a differenciálegyenletek érvényüket veszítik.
- Az erre megoldást jelentő nemlokális modellekben a repedéskeletkezés és terjedés feltételeinek megfogalmazása nehézkes, fizikailag nem megalapozott.

A 2000-es évek elején jelentek meg az első publikációk, melyek egy a klasszikus kontinuummechanikai megközelítéssel szakító leírást javasolnak. A módszer elnevezése peridinamikus anyagmodell lett. Az elnevezés az anyagi pontok közt értelmezett távolba ható erőkre utal.



Az új anyagmodell lehetővé teszi, hogy a mozgásegyenleteket differenciál- helyett integrálegyenletek segítségével fogalmazzuk meg. A beépítésre kerülő konstitutív egyenletek magukban hordozzák a károsodás és repedésterjedés leírásának lehetőségét.

A megjelent publikációk világossá tették, hogy a módszer alkalmas a KM és TM kérdéseinek megválaszolására. Ezek mellett azonban új problémák és kérdések fogalmazódtak meg:

- A módszer sebessége alacsony a KM módszereihez képest.
  - A mozgásegyenletek elsősorban dinamikai feladatok explicit megoldóinak alkalmazását tették lehetővé.
- A nemlineáris problémák kezelése – a fenti okokból kifolyólag – egyelőre váratott magára.

#### A GRAFIKUS KÁRTYÁK ÁLTALÁNOS CÉLÚ PROGRAMOZÁSÁNAK MEGISMERÉSE

A mechanikai feladatok numerikus megoldása hagyományos eszközökkel csak a legegyszerűbb esetekben megvalósítható. A feladatok mérete és bonyolultsága mind méretben, mind időben nagyon hamar meghaladja a papíron történő megoldhatóság határát. Már az 1950-es évek során kiderült, hogy a numerikus megoldási módszerek általában jól algoritmizálhatók, azaz viszonylag könnyű rájuk számítógépes programot írni.

A már említett végeelem-módszert kezdetben elsősorban építőmérnöki szerkezetek tervezési folyamatában az erőtani számítások meggyorsítására alkalmazták.

A személyi számítógépek megjelenésével, fejlődésükkel sebességük, memória- és tárolókapacitásuk növekedésével a megoldható feladatok köre jelentősen kiszélesedett. Ezzel együtt az is elmondható, hogy a mérnöki igények is jelentősen megnöttek. Újabb és újabb kihívások jelentek meg a már meglévő hardver- és szoftverkörnyezetekkel szemben.

*Megjegyzés:* A kezdeti 1 dimenziós, lineárisan rugalmas statikus problémák helyett/mellett ma már általánosak a 3 dimenziós, tranziens, nemlineáris esetleg kapcsolttér-analízis feladatok (pl. folyadék-szilárdtest kölcsönhatás modellezése).

A mérnöki feladatok numerikus megoldásának általában két tényező szab határt:

- a megoldásra rendelkezésre álló idő,
- az adatok kezelésére és tárolására rendelkezésre álló memória és háttértár.

Az előbbi gátat – az elsősorban multimédia alkalmazások igényeinek eleget tevő – a piacon megjelenő nagy kapacitású és olcsó memóriák és háttértárak ledönteni látszanak. A második akadály azonban még a ma már több GHz órajel-frekvencián működő processzorok ellenére sem tűnik legyőzöttnek.

*Megjegyzés:* Az Intel i8086 típusú 1978-ban kiadott processzora 5 MHz órajel-frekvencián működött.

Ennek oka elsősorban az, hogy a számítások elvégzése a számítógép egységei közt rengeteg kommunikációt tesz szükségessé, ez az adatáramlás pedig általában nagyságrendekkel kisebb sebességű, mint a processzoron belüli sebesség.

**1. táblázat. Számítógépes memóriatípusok összehasonlítása**

Memória típusa	Elérési idő	Adatátviteli sebesség
Regiszter	~100 psec	n/a
Gyorsítótár (CACHE)	~10 nsec	~100 Gbyte/sec
RAM	~500 nsec	~1 Gbyte/sec
Hálózati gyorsítótár	~50 μsec	n/a
SSD	~200 μsec	~25 Mbyte/sec
HDD	~20 μsec	~6 Mbyte/sec

A feladatok megoldásához szükséges idő csökkentésének több lehetősége is van:

- A processzorsebesség további növelése,
- Az adatátviteli sebesség növelése,
- A programokban egymástól független adatokon műveleteket végző algoritmusainak egyidejű futtatása: párhuzamosítás.

A processzorok sebessége fizikai okokból nem növelhető bizonyos érték fölé. Ezt a határt a jelenleg alkalmazott technológia lassan el is éri.

A következő lehetőség, hogy az algoritmusok ismeretében a szükséges adatokat jó előre a processzorhoz közel helyezzük el, így csökkentve a processzor várakozási idejét. Ezt a célt szolgálják a gyorsítótárak (CACHE-ek).

Az adatforgalom sebessége növelhető, ha az egyszerre mozgatott adatok mennyiségét növeljük. Az erre szolgáló megoldás a processzorok be- és kiviteli csatornájának szélesítése. A korábbi 8/16 bit helyett számítógépeinkben ma már 64 bites megoldások találhatók.

A párhuzamosításnak mára számos formája elterjedt:

- SISD-architektúra: Single Instruction Single Data,
- MIMD-architektúra: Multiple Instruction Multiple Data:

- Párhuzamosság a processzek szintjén: több független CPU (multicore).
- Párhuzamosság a szálak szintjén: több szál CPU-n belül (multithread).
- MISD-architektúra: Multiple Instruction Single Data (hibatűrő rendszerek),
- SIMD-architektúra: Single Instruction Multiple Data.

Ez utóbbi azt jelenti, hogy ugyanazt az utasítást vagy algoritmust egyszerre több adaton is végrehajtjuk. Ez a megközelítés bár gyökeresen eltér a hagyományos programok lineáris programfuttatási modelljétől, a numerikus módszerek jelentős részénél előnyösen alkalmazható és jelentős sebességnövekedést eredményez.

## Az elmúlt időszak kutatási eredményei

A szilárd test peridinamikus modelljének matematikai leírása

Az elmúlt kutatási időszakban két fizikai probléma peridinamikus leírásának megfogalmazásával foglalkoztunk:

- A hőrugalmas test feladata [1],
- A szilárd test nagy alakváltozásokkal járó deformációjának feladata [2].

Az alábbiakban a fenti két témában elért eredményeinket ismertetjük.

### A HŐRUGALMAS TEST FELADATA

Lineárisan rugalmas anyagi viselkedést feltételezve a nyúlások és feszültségek közti összefüggést az általános Hooke-törvény írja le, míg a hőterjedés és a hőmérsékleti mező közti összefüggés a Fourier-törvény szerint alakul.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\beta} \cdot \theta \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= \frac{1}{2} \cdot (\boldsymbol{\nabla} \otimes \mathbf{u} + \mathbf{u} \otimes \boldsymbol{\nabla}) \\ \mathbf{q} &= -\mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\nabla} \cdot \theta\end{aligned}$$

ahol  $\boldsymbol{\sigma}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\theta$  és  $\mathbf{q}$  a feszültség, fajlagos nyúlás, hőmérséklet és hőfluxus vektor. A szükséges anyagjellemzők a  $\mathbf{C}$ ,  $\boldsymbol{\beta}$  és  $\mathbf{k}$  mennyiségek a rugalmassági, termikus és hővezetési tenzor.

[1] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Peridynamic modelling of crack initiation and propagation in thermo-mechanically loaded electronic devices. *EuroSimE* 2018. 15–18. 04. 2018. Toulouse, France.

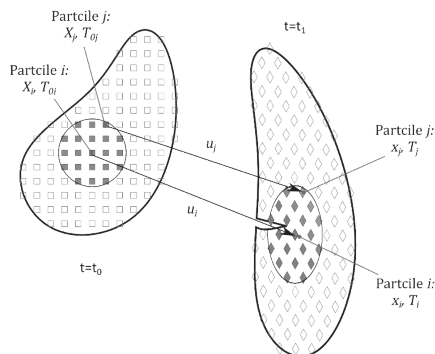
[2] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Higher order peridynamics of large deformation hyperelasticity, *ESMC* 2018. 02–06. 07. 2018. Bologna, Italy.

A differenciál hányadosok – és így a gradiens – peridinamikus közelítését alkalmazva, a nyúlástenzor és hőfluxus a következő alakot ölti:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot \left( \int_{\mathcal{H}} \omega(|\boldsymbol{\mathcal{X}}|) \cdot (\mathbf{u} \otimes \boldsymbol{\mathcal{X}} + \boldsymbol{\mathcal{X}} \otimes \mathbf{u}) dV_{\boldsymbol{\mathcal{X}}'} \right) \cdot \mathbf{K}_0$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \cdot \left[ \int_{\mathcal{H}} \omega(|\boldsymbol{\mathcal{X}}|) \cdot (\mathcal{T} \cdot \boldsymbol{\mathcal{X}}) dV_{\boldsymbol{\mathcal{X}}'} \right] \cdot \mathbf{K}_0$$

1. ábra. A vizsgált pont peridinamikus környezetének értelmezése



A fenti összefüggésekben a következő jelölésekkel éltünk:

– a referencia-pozíció állapot:

$$\boldsymbol{\mathcal{X}}_{ij} = \mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i$$

– az alaktenzor:

$$\mathbf{K}_i = \int_{\mathcal{H}_i} \boldsymbol{\mathcal{X}}_{ij} \circ \boldsymbol{\mathcal{X}}_{ij} d\mathbf{X}_j$$

– az elmozdulásállapot:

$$\mathbf{u}_{ij} = \mathbf{u}_j - \mathbf{u}_i$$

– a hőmérsékleti állapot:

$$\mathcal{T}_{ij} = T_j - T_i$$

– a nyúlásállapot:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} \cdot \int_{\mathcal{H}_i} \omega(|\boldsymbol{\mathcal{X}}|) \cdot (\boldsymbol{\mathcal{X}} \circ \mathbf{u} + \mathbf{u} \circ \boldsymbol{\mathcal{X}}) d\mathbf{X}_j \cdot \mathbf{K}^{-1}$$

- a hővektorállapot:  $\mathbf{q} = -k \cdot \int_{\mathcal{H}_i} \omega(|\mathcal{X}|) \cdot \mathcal{X} \cdot \mathcal{T} d\mathcal{X}' \cdot \mathbf{K}^{-1}$
- az erőállapot:  $\mathbf{T}_{ij} = \omega(|\mathcal{X}_{ij}|) \cdot \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathcal{X}_{ij} \cdot \mathbf{K}_i^{-1}$
- a hőfluxus-állapot:  $Q_{ij} = \omega(|\mathcal{X}_{ij}|) \cdot \mathbf{q}_i \cdot \mathcal{X}_{ij} \cdot \mathbf{K}_i^{-1}$
- a mozgásegyenlet:  $\varrho \cdot \ddot{\mathbf{u}}_i = \int (\mathbf{T}_{ji} - \mathbf{T}_{ij}) d\mathcal{X}_j + \mathbf{b}_i$
- a hővezetés egyenlete:  $\varrho \cdot c_V \cdot \dot{\Theta}_i = \int_{\mathcal{H}_i} (Q_{ji} - Q_{ij}) d\mathcal{X}_j + \boldsymbol{\beta} \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i \cdot \Theta_{i0} + h_i$

A vizsgált test diszkrétizálást követően az egyensúlyi és a hővezetési egyenlete a következő alakra hozható:

$$\mathbf{B}_j^{mechT} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_j + \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{B}_j^{therm} \cdot \boldsymbol{\Theta}_j = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{B}_j^{thermT} \cdot \mathbf{Q}_j + \varrho \cdot s_j = 0$$

ahol

$$\mathbf{B}_i^{mech} = [\mathbf{B}_0 \quad \mathbf{B}_1 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

$$\mathbf{B}_0 = \sum_{j=1}^n \mathbf{B}_j$$

$$\mathbf{B}_j = \mathbf{K}_i \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{i1} \cdot \Delta X_{i1} & 0 & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta X_{in} & 0 \\ 0 & \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{i1} & \dots & 0 & \omega_{in} \cdot \Delta Y_{in} \\ \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{i1} & \omega_{i1} \cdot \Delta X_{i1} & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta Y_{in} & \omega_{in} \cdot \Delta X_{in} \end{bmatrix}$$

és

$$\mathbf{B}_i^{therm} = [\mathbf{B}_0 \quad \mathbf{B}_1 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

$$\mathbf{B}_0 = \sum_{j=1}^n \mathbf{B}_j$$

$$\mathbf{B}_j = \mathbf{K}_i \cdot \begin{bmatrix} \omega_{i1} \cdot \Delta X_{i1} & \dots & \omega_{in} \cdot \Delta X_{in} \\ \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{i1} & \dots & \omega_{i1} \cdot \Delta Y_{in} \end{bmatrix}$$

[1] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Peridynamic modelling of crack initiation and propagation in thermo-mechanically loaded electronic devices. *EuroSimE* 2018. 15–18. 04. 2018. Toulouse, France.

[2] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Higher order peridynamics of large deformation hyperelasticity, *ESMC* 2018. 02–06. 07. 2018. Bologna, Italy.

valamint

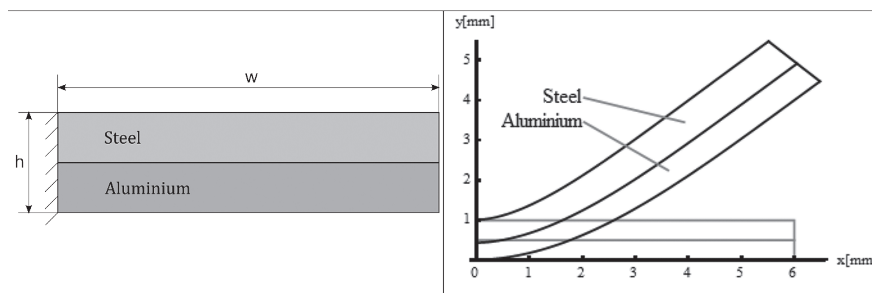
$$\Sigma_j = [\sigma_0^T = \sigma_j^T \quad \dots \quad \sigma_n^T]$$

$$\mathbf{Q}_j = [q_0^T = q_j^T \quad \dots \quad q_n^T].$$

A fenti egyenletrendszer megoldását stacioner és tranziens hővezetés esetére is vizsgáltuk. Foglalkoztunk a megoldás konvergenciájának vizsgálatával. A  $r$  peridinamikus sugár rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és az adott  $r$  sugárra jellemző értékhez tart. A szomszédos csomópontok számának rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és a klasszikus megoldáshoz tart.

Eredményeinket a [1] előadásban és a kapcsolódó konferenciakiadványban tettük közzé.

### 2. ábra. Bimetál hőtágulása: a peridinamikus modell alakváltozása



*A szilárd test nagy alakváltozásokkal járó deformációjának feladata [2]*

A nagy alakváltozásokkal járó mechanikai feladatok megoldása során általában a növekményes, azon belül pedig iterációs módszerek alkalmazása vált be. K. J. Bathe klasszikusnak tekinthető „Finite Element Procedures” című könyvében e módszerekkel szemben támasztott követelményekről az alábbiakat olvashatjuk:

- ...the correct calculation of  $\mathbf{F}_{t+\Delta t}^{i-1}$  from  $\mathbf{U}_{t+\Delta t}^{i-1}$  is crucial. Any errors in this calculation will, in general, result in an incorrect response prediction.
- ...the correct evaluation of tangent stiffness matrix  $\mathbf{K}_{t+\Delta t}^{i-1}$  is also important. The use of the proper tangent stiffness matrix may be necessary for convergence and, in general, will result in fewer iteration until convergence is reached.

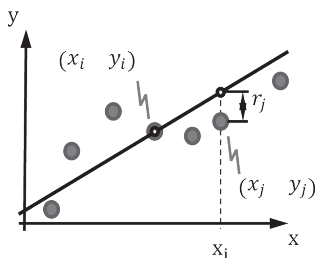
A fenti idézetek alapján tehát kijelenthetjük, hogy:

- akkor várhatunk pontos eredményeket a megoldótól, ha az elmozdulás-növekmények pontosan elő tudják állítani az alakváltozási gradiens növekményét,
- akkor várhatunk elvárható sebességű konvergenciát, ha az érintómerevségi-mátrix előállítása szintén pontos.

Megvizsgáltuk, hogy az állapotalapú peridinamikus modell esetében a fenti követelmények teljesíthetők- e és arra az eredményre jutottunk, hogy a módszer nem alkalmas nagy merevtestszerű elmozdulások pontos kiszámítására.

Bizonyítottuk, hogy ennek oka: Az állapotalapú peridinamikus modell által előállított differenciál hányadosok, így az alakváltozási gradiens is, a vizsgált pont környezetében lévő függvényértékek lineáris közelítésének meredekségével egyeznek meg. Nézzünk erre egy rövid magyarázatot!

### 3. ábra. A lineáris regressziós egyenes értelmezése



Az egyenes egyenlete egy  $x_i$  csomópont környezetében:

$$\tilde{y}_i(x) = y_i + a_1 \cdot \Delta x_{i,j}$$

Alakmazva az egyenletet az  $i$ . pont környezetében lévő  $j=1..NP$  pontokra:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{i,1} \\ \Delta x_{i,2} \\ \vdots \\ \Delta x_{i,NP} \end{bmatrix} \cdot \{a_1\} = \begin{Bmatrix} y_1 - y_i \\ y_2 - y_i \\ \vdots \\ y_{NP} - y_i \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{a} = \Delta \mathbf{y}$$

Az így kapott túlhatározott lineáris egyenletrendszer legkisebb hibanégyzet megoldása:

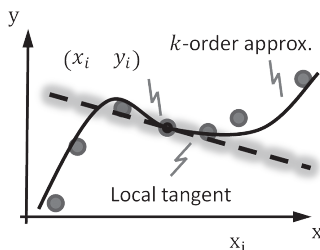
$$\mathbf{a} = (\mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{P})^{-1} \cdot \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \Delta \mathbf{y}$$

Ha a  $p(x)$  polinom lineáris, a közelítő függvény első deriváltja megegyezik a derivált szokásos peridinamikus közeklítésével:

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

Korábbi, a hálómétes módszerekkel kapcsolatos, kutatási eredményeinkre támaszkodva bevezettünk egy a függvényértéket magasabb fokon közelítő és így pontosabb deriváltakat eredményező peridinamikus modellt.

4. ábra. A  $k$ -fokú regressziós polinom és lokális érintője



A lineáris helyett magasabb fokú közelítést alkalmazva

$$\tilde{y}_i(x) = y_i + \mathbf{p}(x - x_i) \cdot \mathbf{a}$$

ahol  $p(x)$  egy tetszőleges fokszámú polinom bázis:

$$\mathbf{p}(x) = \{x, y, x^2, x \cdot y, y^2, x^3, x^3 \cdot y, x \cdot y^2, y^3, \dots\}$$



A polinom tagjainak együtthatói:  $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots\}$

Az együtthatók és a függvény deriváltjainak  $x_i$  helyen felvett értéke közti kapcsolat bizonyíthatóan:

$$\mathbf{a} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial x_1}, \frac{\partial f}{\partial x_2}, 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}, 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}, \dots \right\}$$

A fenti eredményt alkalmazzuk a mechanikai feladatban szereplő egyenletek összeállítására!

- A csomópontok kezdeti koordinátáinak halmaza:  $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_A, X_{(A+1)}, \dots, X_{NNA}\}$
- A pillanatnyi koordináták halmaza:  $\mathbf{x} = \{..\}$ .
- Az A csomópont családja:  $\mathbf{X}_A = \{X_1, X_2, \dots, X_{A+1}\}$
- A család tagjainak száma:  $NNA$
- A polinom bázis:  $\mathbf{p}(\mathbf{x}) = \{x, y, x^2, x \cdot y, \dots, y^{NP}\}$
- A csomóponti polinom mátrix:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(\mathbf{X}_{A1}) \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_{A2}) \\ \vdots \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_{ANNA}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_A) \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_A) \\ \vdots \\ \mathbf{p}(\mathbf{X}_{ANNA} - \mathbf{X}_A) \end{bmatrix}$$

The complete differential operator:

$$\mathbf{D} = ((\mathbf{P})^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{P})^{-1} \cdot (\mathbf{P})^T \cdot \mathbf{W}$$

Legyen az alakváltósági gradiens vektor:  $\mathbf{F} = \begin{Bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{21} \\ F_{22} \end{Bmatrix}$

Az alakváltósági gradiens előállító mátrix:

$$\mathbf{V}_F = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{12} & 0 & \dots & \dots & D_{1NNA} & 0 \\ D_{21} & 0 & D_{22} & 0 & \dots & \dots & D_{2NNA} & 0 \\ 0 & D_{11} & 0 & D_{12} & \dots & \dots & 0 & D_{1NNA} \\ 0 & D_{21} & 0 & D_{22} & \dots & \dots & 0 & D_{2NNA} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}^A = \mathbf{V}_F^A \cdot \mathbf{x}^A = \sum_{B=1}^{NNA} \mathbf{V}_F^{AB} \cdot (\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_A) \cdot \Delta V_B$$

[2] Ladányi, G.–Gonda, V. (2018): Higher order peridynamics of large deformation hyperelasticity, *ESMC* 2018. 02–06. 07. 2018. Bologna, Italy.

Legyen a feszültségvektor:  $\mathbf{P}^T = \{P_{11} \quad P_{22} \quad P_{12}\}$

Legyen a feszültség-divergencia vektor:  $DIV \mathbf{P} = \begin{Bmatrix} P_{11,1} + P_{21,2} \\ P_{12,1} + P_{22,2} \end{Bmatrix}$

A divergencia vektort előállító mátrix:

$$\nabla_{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 & D_{21} & 0 & D_{12} & 0 & D_{22} & 0 & \cdots & D_{1N} & 0 & D_{2N} & 0 \\ 0 & D_{11} & 0 & D_{21} & 0 & D_{12} & 0 & D_{22} & \cdots & 0 & D_{1N} & 0 & D_{2N} \end{bmatrix}$$

$$DIV \mathbf{P} = \nabla_{\mathbf{P}}^A \cdot \mathcal{P} = \sum_{B=1}^{NNA} \nabla_{\mathbf{P}}^{AB} \cdot (\mathbf{P}(\mathbf{X}_B) - \mathbf{P}(\mathbf{X}_A)) \cdot \Delta V_B$$

A mozgásegyenlet a teljes Lagrange-formalizmusban megfogalmazva:

$$DIV \mathbf{P}(\mathbf{X}_A) + \mathbf{B}(\mathbf{X}_A) = \rho \cdot \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{X}_A)$$

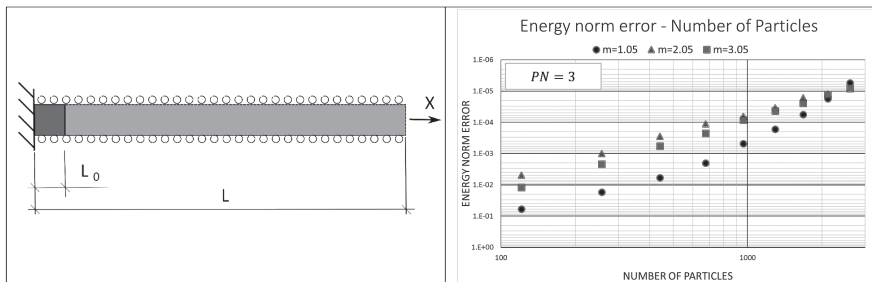
$$\sum_{B=1}^{NNA} \nabla_{\mathbf{P}}^{AB} \cdot (\mathbf{P}(\mathbf{X}_B) - \mathbf{P}(\mathbf{X}_A)) \cdot \Delta V_B + \mathbf{B}(\mathbf{X}_A) = \rho \cdot \ddot{\mathbf{u}}(\mathbf{X}_A)$$

$$\nabla_{\mathbf{P}}^{AB} = \begin{bmatrix} D_{1B} & 0 & D_{2B} & 0 \\ 0 & D_{1B} & 0 & D_{2B} \end{bmatrix}$$

A fenti egyenletrendszer megoldását statikus feladatok esetében vizsgáltuk. Foglalkoztunk a megoldás konvergenciájának vizsgálatával. A  $\mathcal{r}$  peridinamikus sugár rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és az adott  $\mathcal{r}$  sugárra jellemző értékhez tart. A szomszédos csomópontok számának rögzítése mellett a csomópontok számának növelésével a megoldás konvergens és a klasszikus megoldáshoz tart.

Eredményeinket a [2] előadásban és a kapcsolódó konferenciakiadványban tettük közzé.

5. ábra. Nagy (16-szoros) alakváltozásnak kitett lemez: a peridinamikus modell hibájának konvergenciája



#### A NUMERIKUS FELADAT ELŐKÉSZÍTÉSÉNEK PROBLÉMÁJA

A számítások végrehajtása általában az alábbi forgatókönyv szerint zajlik:

1. Csomópontok létrehozása a testen belül és annak peremén.
2. A csomópontok peridinamikus kapcsolatainak összeállítása.
3. A mozgás/egyensúlyi vagy hővezetési egyenletrendszer felírása és
  - a. egylépéses vagy
  - b. nemlineáris esetben többlépéses megoldása.
4. Az eredmények kiértékelése és a másodlagos eredmények kiszámítása.

A kutatás során az egyik kitűzött célunk egy megbízható és a korábbiaknál gyorsabb peridinamikus megoldó létrehozása volt.

A csomópontok létrehozása a feladatul kitűzött egyszerű esettanulmányokban – köszönhetően az egyszerű geometriai kialakításnak – nem járt jelentős időszükséglettel. A későbbiekben, bonyolultabb geometriával rendelkező feladatok esetén itt még felmerülhetnek kérdések.

A peridinamikus mozgás-, egyensúlyi- vagy hővezetési egyenletek nemlokális természetűek, az egy tetszőlegesen kiválasztott anyagi pont gyorsulását/egyensúlyát vagy hőmérsékletét nem csak közvetlen, de véges távolságban lévő környezet is befolyásolja. A csomópontok peridinamikus kapcsolatain az ezen a távolságon belül elhelyezkedő szomszédokat értjük.

Megmutattuk, hogy a peridinamikus megoldás minősége – pontossága és a számítások stabilitása – egyértelműen függ a csomópontok kapcsolatainak számától. [3]

[3] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Development and application of P-adaptive peridynamics on large deformation hyperelasticity. *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*.

A kapcsolatok összegyűjtésére számos algoritmus található a számítógépes grafikával (computational graphics) és a szemcsés halmazok (particle dynamics) mechanikájával kapcsolatos szakirodalomban. A peridinamikus kutatások egyelőre nem helyeztek erre túl nagy súlyt. A szomszédkeresés kétféle követelmény szerint lehetséges:

- az NN számú legközelebb lévő szomszédot keressük vagy
- az R sugarú körön/gömbön belül lévő szomszédot keressük.

A legelterjedtebb szomszédkereső algoritmusok:

### *Lineáris keresés*

Az NNS-probléma legegyszerűbb megoldása az, ha kiszámítjuk a lekérdezési ponttól az adatbázis minden más pontjához való távolságot, nyomon követve az „eddig legjobbat”. Ennek az algoritmusnak, amelyet néha naiv megközelítésnek is neveznek,  $O(kN)$  futási ideje van, ahol  $N$  az  $S$  halmaz elemeinek száma, és  $k$  az  $M$  tér dimenzionalitása. Nyilvánvaló, hogy nagy elemszám esetén a lineáris keresés lassú, viszont nincsenek fenntartandó keresési adatstruktúrák, valamint a naiv keresés akár felül is múlhatja a térfelosztási megközelítéseket a magasabb dimenziós tereken.

### *Térfelosztás*

A térfelosztáson alapuló módszerek lényege, hogy a keresési halmazt, egy pontot kiválasztva és eltávolva, két elkülönült térrészre osztják, majd a létrejött részhalmazokon rekurzív módon folytatják a felosztást, ezáltal egy bináris keresőfat hozva létre. Az NNS a keresőfa bejárásával valósul meg, összehasonlítva a keresési pontot az aktuális csomópontban tárolt értékkel. Az egyes módszerek az egyes térrészek elkülönítésének módjában különböznek egymástól (koordinátáskereséssel történő metszés, általános helyzetű síkokkal történő metszés, gömbalakú térrészek elkülönítése stb.)

Véletlenszerű eloszlásban adott pontok keresési halmazán a térfelosztási eljárások komplexitása  $O(\log N)$ , ami a lineáris keresésnél jóval kedvezőbb. A legrosszabb esetben a komplexitás  $O(kN^{1-1/k})$ .

### *Közelítő módszerek*

Az előzőekben felsorolt módszerek az egzakt algoritmusok csoportjába tartoznak. A keresés eredménye a lekérdezési ponthoz ténylegesen legközelebbi pont. Mindazonáltal egyes algoritmusok teljesítménye romlik, ha az adatok dimenziószáma növekszik (curse of dimensionality). Így fordulhat elő, hogy a magas dimenziószerű rendszerekben a kifinomult algoritmusok nem teljesítenek jobban, mint a nyers erővel végrehajtott lineáris keresés.

Az NNS közelítő módszereinél a fő szempont a lekérdezés ideje és a pontosság közötti kompromisszum, melyet a megtalált pontnak az igazi legközelebbi ponttól vett távolságával, vagy az igazi legközelebbi pont megtalálásának valószínűségével lehet jellemezni. Többféle megközelítés létezik, és megvalósításukat széles körben használják a gyakorlati alkalmazásokban.

### *A megfelelő algoritmus kiválasztása*

A peridinamikusan feladatok esetében jellemző a nagy elemszám, és a dimenziók viszonylag alacsony száma, lévén a két- vagy háromdimenziós euklideszi térről szó, ezért a közelítő módszerek alkalmazása nem indokolt. Ugyanezen szempontok alapján a lineáris keresés sem célszerű, hanem valamely térfelosztási módszer használata tűnik megfelelőnek. Választásunk az adatszerkezetek és az algoritmusok viszonylagos egyszerűsége okán a KD-tree adatszerkezetre esett.

Kutatásainkban összehasonlítottuk az alábbi algoritmusok alkalmazhatóságát és sebességét:

- naiv algoritmus CPU-n futtatva,
- K-d tree algoritmus CPU-n futtatva,
- Fast Clustering algoritmus CPU-n futtatva,
- K-NearestNeighbours algoritmus GPU-n futtatva.

*Megmutattuk, hogy a csomópontok számától és kívánt kapcsolatok számától (NN) vagy a kívánt sugár (R) méretétől függően a CPU-alapú K-d tree vagy a GPU-alapú K-NearestNeighbours algoritmus a hatékonyabb. [3]*

[3] Ladányi, G.– Gonda, V. (2018): Development and application of P-adaptive peridynamics on large deformation hyperelasticity. *Journal of Peridynamics and Nonlocal Modeling*.

*A KD-tree adatszerkezet**Az adatszerkezet leírása*

A KD-tree ( $k$ -dimensional tree,  $k$  dimenziós fa) egy bináris térfelosztáson alapuló adatszerkezet a  $k$ -dimenziós térben lévő pontok rendezéséhez.

A KD-tree egy bináris fa, melynek csomópontjai  $k$ -dimenziós pontokat tárolnak. A nem-levél csomópontok implicit módon metszősíkokat (hipersíkokat) határoznak meg, melyek a teret két részre, félterekre osztják. A metszősík egyik (pozitív) oldalán található pontok a jobb alfában (subtree), míg a másik (negatív) oldali pontok a bal alfában tárolódnak. A metszősíkok tartalmazzák az adott csomópontban tárolt pontot. A metszősíkok orientációja olyan, hogy normálisuk mindig valamelyik koordinátatengely. A fa egy adott szintjén a metszősíkok normálisa megegyezik. A fa első szintjén a metszősík normálisa az  $x$  tengely, a következő szinten az  $y$  tengely, majd a  $z$  tengely és így tovább. A metszési orientációk ciklikusan követik egymást, tehát háromdimenziós esetben a fa negyedik szintjén ismét az  $x$  koordináták szerinti szétválasztás történik.

Tehát ha egy adott csomópontban az  $x$  tengely a szétválasztási tengely, valamennyi pont a csomópont-hoz tartozó alfában, melynek kisebb az  $x$  koordinátája, mint a csomópontban tárolt, a bal oldali alfában, a többi a jobb oldali alfában lesz található.

*Műveletek a KD-tree adatszerkezeten**Létrehozás*

Az adatszerkezet létrehozásakor többnyire megtörténik a teljes adatmennyiség ( $N$  db pont) feltöltése, melynek szokásos módja:

- A fában lefelé haladva ciklikusan váltogatjuk a felosztási síkokat.
- Az aktuális alfához tartozó csomópontba a ponthalmaz aktuális szintnek megfelelő koordinátaértékek szerinti mediánja kerül.
- A ponthalmaz mediánnál kisebb koordinátájú pontjai a bal oldali alfába kerülnek, a többi a jobb oldaliba.
- A bal és jobb oldali ponthalmazok felosztása rekurzív módon folytatódik, míg a felosztandó ponthalmaz számossága el nem éri az 1-et.

Ez a módszer kiegyensúlyozott fát eredményez, vagyis a bal- és jobboldali részfákban tárolt pontok száma megegyezik, ezáltal a fa mélysége minimális lesz.

A medián választása nem feltétlenül szükséges, de ekkor a fa nem lesz kiegyensúlyozott, sőt szélsőséges esetben – mikor az input pontok úgy érkeznek, hogy mindig a bal ágra (vagy mindig a jobbra) kerülnek – a fa láncolt listává fajulhat. A túl szabályosan érkező bemenő adatok kiküszöbölésének egy egyszerű módja azok előzetes összekeverése. Egyes implementációk néhány véletlenszerűen választott pontra végzik el a sorba rendezést, majd ezen pontok mediánját használják a metszősík meghatározására. Egy alternatív algoritmus az adatok sorba rendezése a KD-tree felépítése előtt. Ha a fa felépítése közben megőrizzük az előre megállapított sorrendet, elkerülhető a felosztás minden szintjén elvégezni a költséges mediánkeresést. A sorba rendezést k esetben kell elvégezni, minden egyes dimenzióra.

### *Elem hozzáadása*

Új elemet ugyanúgy kell hozzáadni a KD-tree adatstruktúrához, mint bármely más keresőfához. Először bejárjuk a fát annak gyökerétől kezdve, az ágakon balra, vagy jobbra haladva, aszerint, hogy a beillesztendő pont a hasítósisik „bal” vagy „jobb” oldalán van-e. Amint egy levélhez jutunk, hozzáadjuk az új pontot a levél bal vagy jobb gyermekeként, az új pont és a levélben tárolt pont megfelelő koordinátájának összevetése alapján. Az ilyen pontok hozzáadása a fa kiegyensúlyozatlanságához vezethet.

### *Elem törlése*

Az elem törlésekor meg kell őrizni a fa rendezettségét. Egy lehetséges megoldás, hogy képezzük a törlendő ponthoz tartozó részében tárolt elemek halmazát, és ezen elemekre újra elvégezzük a fa felépítését ezekkel az elemekkel.

### *Kiegyensúlyozás*

A KD-tree adatszerkezet utólagos kiegyensúlyozása a bináris fákra alkalmazott forgatási technikával nem lehetséges, mert az felborítaná a fa azon tulajdonságát, hogy a csomópontoktól balra eső pontok a csomópontokhoz tartozó metszősík egyik oldalán, a jobbra eső pontok a másik oldalon helyezkednek el.

### *NNS*

A legközelebbi szomszédkeresési (NN) algoritmus célja, hogy megtalálja a fa azon pontját, amely a legközelebb van egy adott bemeneti ponthoz. Ez a keresés hatékonyan végezhető el, hiszen a fa tulajdonságainak segítségével gyorsan kiküszöbölhetjük a keresési tér nagy részét.

Az algoritmus egyszerű módosítással bővíthető úgy, meg tudja adni a ponthoz legközelebbi m szomszédot, ha egy helyett m aktuális legjobbat tart fenn. Egy részfa csak akkor hagyható figyelmen kívül, ha már rendelkezésre áll m eddigi legjobb, és a részfa nem lehet közelebbi pontja, mint az m aktuális legjobb közül a legtávolabbi.

### *Tartomány-keresés*

Egy adott lekérdezési tartomány (téglalap, téglatest, hipertéglatest) összes pontjának megtalálásához a gyökértől kezdve rekurzív módon bejárjuk mindkét alfát. Ha a keresési tartomány nem metszi a vizsgált csomópontoz tartozó tartományt, akkor a csomópont és részfáinak további feltárása nem szükséges. Vagyis csak azokat a részfákat járjuk be, amelyeknél van esély a lekérdezési tartományba eső csomópontok találására.

Az általános célú grafikus kártya programozása során feltérképeztük a két legelterjedtebb – az NVIDIA/CUDA és az OpenCL – rendszer ilyen irányú lehetőségeit. Tapasztalatunk szerint az NVidia grafikus kártyák – tesztjeink során egy GeForce GTX950M és egy GeForce 1660 Ti videokártyával felszerelt számítógépet használtunk – a CUDA programozási nyelv alkalmazásával 5–25%-kal gyorsabb eredményre vezettek ugyanazon feladatok megoldása során. Az OpenCL-környezet ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a megírt kód szinte változtatás nélkül más, nem nVidia gyártmány videokártyán, illetve heterogén számítási környezetben is futhasson. Ennek tesztelésére programjainkat a grafikus kártyák mellett számítógépeinkben található többmagos processzorokon is futtattuk. A tesztekhez egy Intel i5-650, egy Intel i7-5820 és egy Intel i7-9750 típusú processzorral rendelkező számítógépet használtunk. Tapasztalataink szerint a két típus és azon belül a generációk közti teljesítmény-növekedés jelentős, ugyanakkor a CPU-n történő futtatás sebessége 2–3 nagyságrenddel elmarad a GPU-n történő futtatáshoz képest.

Bizonyított, hogy a Fast Clustering eljárás részét képező d-tree struktúraépítő eljárás a leggyorsabb szomszédkereső algoritmus, sebessége  $n \cdot \log(n)$  nagyságrendű. Ez az algoritmus azonban nem párhuzamosítható, így alkalmatlan a CUDA/OpenCL nyelv lehetőségeinek kiaknázására. A fában történő keresés párhuzamosítható.

A naiv algoritmus nem optimális, sebessége  $n^2$  nagyságrendű, ugyanakkor jól párhuzamosítható.

A leghatékonyabb megoldást egy kombinált program összeállítása jelentheti. A szomszédkereséshez szükséges fastruktúra felépítésére a Fast Clustering-módszert érdemes használni, a fában a szomszédok keresését párhuzamosítva, grafikus processzoron érdemes végrehajtani.

A megoldás hátránya, hogy két architektúra – a CPU (host) és a GPU (device) – közti kommunikáció általában két nagyságrenddel lassabb az adott architektúrán belüli átviteli sebességnél. Ez a hátrányt csak nagy mennyiségű adat kezelése esetén képes kompenzálni a két architektúrára illesztett kód.



A NUMERIKUS FELADAT MEGOLDÁSÁNAK PROBLÉMÁJA

A szilárd test peridinamikus modelljének matematikai leírása alfejezetben ismertetett egyenletek analitikus megoldására nincs általános módszer, ezért A numerikus feladat előkészítésének problémája alfejezetben összefoglalt módszerekkel létrehozott csomópontokra diszkrétizált egyenletrendszert értelmeltünk. Az lineáris egyensúlyi problémák vizsgálata során ez az egyenletrendszer egy

$$[K] \cdot \{d\} = \{F\}$$

alakú lineáris egyenletrendszer, mely tartalmazza a belső csomópontok egyensúlyi feltételeit és a peremen elhelyezkedő pontok terhelési feltételeit. A tapasztalataink szerint ennek az egyenletrendszernek stabilitása függ a csomópontok elhelyezkedésétől és a csomóponti kapcsolatok számától. Azonosan kedvezőtlen feltételek mellett több megoldási módszert is kipróbáltunk:

- Gauss-elemináció (GE).
- Gauss-elemináció részleges főelemkiválasztással.
- Gauss-elemináció teljes főelemkiválasztással.
- Krylov-módszer.
- Adaptív dinamikus relaxáció (ADR) módszere.

*Tapasztalatink szerint az utolsóként említett módszer bizonyult a legstabilabbnak.* [4]

Az ADR-módszer alkalmazása mellett szól az a tény is, hogy rendkívül alkalmas párhuzamos megvalósításra. Ennek bizonyítására elkészítettük az ADR-módszer CUDA/OpenCL környezetben működő kódját.

A kód sebességét különböző méretű és tulajdonságú lineáris egyenletrendszereken teszteltük, illetve teljesítményét összehasonlítottuk az elmúlt időszakban közzétett cuBLAS-könyvtár adta lehetőségekkel. Tapasztalataink szerint az említett kódok hatékonysága a következőképpen alakul:

1. cuBLAS.
2. ADR on CUDA.
3. Gauss elimináció-részleges főelemkiválasztással CUDA-környezetre ültetve.

[4] Ladányi G.:  
*Nemlineáris szilárdsági feladat megoldása adaptív relaxáció módszerével.*  
 Tudományos Hét –  
 Dunaiútváros – 2017.  
 11. 15.

[5] Ladányi, G.–  
Gonda, V. (2018):  
Application of higher  
order peridynamics  
on large deformations.  
IWCMM 2018. 10-13.  
09. 2018. Glasgow,  
UK.

A nemlineáris egyensúlyi problémák esetében a fenti egyenletrendszer az alábbiak szerint módosul:

$$[K(\mathbf{d})] \cdot \{\mathbf{d}\} = \{\mathbf{F}(\mathbf{d})\}$$

Vagyis a szerkezet merevsége és a terhelés az elmozdulás függvénye. A feladat megoldását ebben az esetben általában növekményes módszerek segítségével állítjuk elő. A szilárd testek mechanikájában elsősorban a Newton–Raphson iterációs eljárások a legelterjedtebbek. Kifejlesztettük az ehhez szükséges algoritmusokat, melyeket az előző alfejezetben említett statikai feladatok megoldására eredményesen alkalmaztunk.

Elkészítettük a módosított NR- (mNR) iteráció algoritmusát. Tapasztalatunk szerint enyhén nemlineáris feladat esetében az mNR-algoritmus sebessége meghaladja az NR-algoritmusét, míg erős nemlinearitás esetén az NR-algoritmus bizonyult hatékonyabbnak.

#### A REPEDÉS MEGJELENÉSÉNEK ÉS TERJEDÉSÉNEK PROBLÉMÁJA [5]

A nagy alakváltozásokkal járó statikus vagy kvázi-statikuss feladatok, illetve a repedésterjedési folyamatok általában nagyságrendekkel eltérő időléptékben zajlanak le. Egy szakító kísérlet például általában több másodpercig tartó rugalmas vagy rugalmas-képlékeny alakváltozást okozó tehernövekedéssel jár, majd a makroszkopikus repedés megjelenését követően néhány ezred vagy század másodperc alatt a keresztmetszet teljes töréséhez vezet.

A numerikus modellezés során ez a skálabeli eltérés komoly gondot okoz. A repedésterjedés leírása szinte kizárólag időben explicit típusú megoldóval lehetséges. Ennek stabilitása a választott időlépés nagyságától függ. Általában elmondható, hogy ha pontosabb megoldást eredményező több csomópontot alkalmazunk, kisebb időlépésre van szükség.

Ez az időlépés azonban elfogadhatatlanul rövid a repedés megjelenését megelőző kvázi-statikuss feladat megoldásához.

A kvázi-statikuss feladat megoldását, különösen, ha az geometriai vagy anyagi nemlinearitást tartalmaz, időben implicit megoldóval érdemes meghatározni. Az implicit megoldókról az előzős alfejezetben már röviden említést tettünk.

Az általunk fejlesztett rendszerben lehetőség van arra, hogy a mechanikai feladat megoldását automatikusan két szakaszra bontsuk. A megoldó elkészíti a kvázi-statikuss feladat repedésmentes megoldásának lépéseit. Minden teherlépés megoldása után megvizsgálja, hogy az adott lépésben volt-e repedés-megjelenés. Ha nem, úgy az implicit megoldó folytatódik a következő teherlépéssel. Ha igen, akkor az implicit megoldó átadja a futási eredményeket az explicit megoldónak, mely folytatja a repedésterjedési probléma megoldását.

A fenti megoldási stratégiát eredményesen alkalmaztuk vékony, síkjukban terhelt lemezek szakadásának modellezésére. Eredményeinkről konferenciaelőadásban és kiadványban számoltunk be. [5]

## A peridinamikus modellezés hatékonyságának javítása ekvidisztáns pontkiosztás esetén

A korábbiak során feltételeztük, hogy a peridinamikus pontok elhelyezkedése tetszőleges a vizsgált testen belül. Ez a feltételezés számos pontban megnehezíti a peridinamikus modellezést:

- a szomszédkeresésre csak a már ismertett általános rutinok használhatók,
- a pontok erősen heterogén sűrűségű elhelyezkedése esetén a megoldandó egyenletrendszer gyakran rosszul kondicionált, így a megoldás instabil és gyenge minőségű,
- nemlineáris feladatok esetében a stabilitási probléma halmozottan jelenik meg.

Jelentős leegyszerűsítést jelent, ha a teljes modellt egymástól azonos távolságban lévő, azaz ekvidisztáns, pontkiosztással valósítjuk meg. Ekkor a fent leírtnál hatékonyabb szomszédkereső algoritmusok is alkalmazhatók, továbbá a megoldandó egyenletek is kedvezőbb tulajdonságúak.

Vizsgálatainkban arra kerestük a választ, hogy az egyenletrendszer – szintén jelentős számítási kapacitást lekötő – összeállítása gyorsítható-e.

Vizsgálatunkat egy belső pont – azaz a test határától a peridinamikus sugárnál nagyobb távolságra lévő – pont mozgásegyenletének elemzésével kezdtük. Arra – ma már nyilvánvalónak tűnő – következtetésre jutottunk, hogy ilyen pont esetében a pontra jellemző egyenletrendszer mindig azonos. A lokális egyenletrendszerből a globálisba történő másolás „csak adatszerkezet-manipulációs” kérdés, a pont szomszédjainak ismeretében jól algoritimizálható.

A test pereméhez közel – vagyis a peridinamikus sugárnál közelebb – eső pontok esetében első közelítésben érdemes lehet minden pont egyenletrendszerét kiszámolni. A problémát megvizsgálva arra a következtetésre juthatunk, hogy a peremhez közeli pontok – attól függően, hogy hány szomszédot tartalmazó peridinamikus sugárral dolgozunk – tipizálhatók néhány alapesetre.

A típuspontok egyenletrendszere ismét típusonként azonos. Az egyenletrendszerekből készítettünk egy könyvtárat – talán helyesebb a look-up-analógia – melyből tetszőleges pont típusa alapján kiválasztható a neki megfelelő egyenletrendszer. A pontok tipizálása és az egyenletrendszer betöltése után a lokális egyenletrendszerből a globálisba történő másolás „csak adatszerkezet-manipulációs” kérdés, a pont szomszédjainak ismeretében jól algoritmizálható.

A hagyományos és az így felépített programsebesség közti különbség a csomópontok számának növelésével rohamos mértékben nő. Megállapítottuk, hogy a look-up tábla alkalmazása rendkívüli sebességnövekedést eredményez.

#### *Köszönetnyilvánítás*

A közlemény megjelenését az EFOP-3.6.1-16-2016- 00003 „K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen” című projekt támogatta.

# Galéria

Sóti István fotói















