

**ÚJ KUTATÁSI IRÁNYOK ÉS EREDMÉNYEK A  
NYERSANYAGELŐKÉSZÍTÉSBEN**

**Professzor Emeritus Dr. habil. Csóke Barnabás  
80. születésnapjára**

ISBN 978-963-358-411-8  
(elektronikus kiadásban: ISBN 978-963-358-412-5)

A Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar konferencia kiadványa  
Miskolc, 2026. január 9.

# **ÚJ KUTATÁSI IRÁNYOK ÉS EREDMÉNYEK A NYERSANYAGELŐKÉSZÍTÉSBEN**

**Professzor Emeritus Dr. habil. Csőke Barnabás  
80. születésnapjára**

A Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar konferencia kiadványa  
2026. január 9.

KIADÓ:  
MISKOLCI EGYETEM  
MŰSZAKI FÖLD- ÉS KÖRNYEZETTUDOMÁNYI KAR  
H-3515 Miskolc-Egyetemváros

ISBN 978-963-358-411-8  
(elektronikus kiadásban: ISBN 978-963-358-412-5)

SZERKESZTETTE ÉS LEKTORÁLTA:  
Prof. Dr. Faitli József, egyetemi tanár

KIADÁSÉRT FELELŐS:  
Prof. Dr. Szűcs Péter, egyetemi tanár, általános és tudományos rektorhelyettes

## Tartalomjegyzék

- Horváth Zita  
Prof. Dr. Csőke Barnabás egyetemi tanár 80. születésnapjára ..... 5
  
- Mucsi Gábor  
Köszöntő, Dr. Csőke Barnabás professzor úr 80. születésnapjára ..... 7
  
- Nagy Sándor  
Csőke Barnabás professzor köszöntése ..... 9
  
- Farkas Géza  
Köszöntő, Dr. Csőke Barnabás professzor úr 80. születésnapjára ..... 11
  
- Bőhm József  
Dr. Csőke Barnabás okleveles bányamérnök szakmai pályafutása „Ahonnan elindult és ahova eddig elért” ..... 13
  
- Csőke Barnabás  
Rudas- és golyósmalmok modellezése a minőségsszabályozás és malomtervezés érdekében ..... 17
  
- Faitli József  
Az alapvizsgálattól az üzemkimérésig, néhány példa a mechanikai eljárás technika tudományterületén ..... 33
  
- Rácz Ádám  
Aprítási eljárások fejlesztése a hulladékaprítástól a szemcsealak-módosításig 53
  
- Szabó Roland, Csőke Barnabás, Mucsi Gábor  
Cementhelyettesítő és geopolimer alapanyagok előállítása mechanikai aktiválással – szemelvények Csőke Barnabás és munkatársai kutatási eredményeiből ... 60
  
- Nagy Sándor, Faitli József, Bokányi Ljudmilla, Mádainé-Üveges Valéria  
Városi bányászat: elektronikai hulladékok, roncsautók ..... 74



**PROF. DR. CSŐKE BARNABÁS EGYETEMI TANÁR**  
**80. SZÜLETÉSNAPJÁRA**

HORVÁTH ZITA

*Miskolci Egyetem, Rektori – Gazdasági Vezetői Hivatal*  
*rektor@uni-miskolc.hu*

A Miskolci Egyetem Szenátusa, professzorai és minden polgára nevében nagy tisztelettel és őszinte megbecsüléssel köszöntöm 80. születésnapján, Prof. Dr. Csőke Barnabás egyetemi tanárt, az Eljárástechnikai Tanszék, ill. a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet volt vezetőjét.

Professzor úr eddigi életének 61 éve kötődik a Miskolci Egyetemhez. A Nehézipari Műszaki Egyetem Bányamérnöki Karán 1964-ben megkezdett tanulmányait befejezve, 1969-től dolgozik az egyetem oktatói közösségében. Már egyetemi hallgatóként elkötelezte magát a tudomány, az egyetemi oktatás és kutatás iránt. A Dr. Tarján Gusztáv akadémikus vezette Ásványelőkészítési Tanszéken, hallgatóként végezte első kutatásait és készített társaival sikeres TDK munkát. Ezt követően kapott meghívást a tanszékre, ahol kezdetben gyakornok, majd a tudományos munkásságának eredményei alapján, az oktatói pálya fokozatain haladva, sikeresen habilitált és 1998-tól egyetemi tanárként végez még ma is kiemelkedő színvonalú, nemzetközileg is elismert, oktató-, kutató-, tudományos munkát.

Professzor Úr 1995-ben kapott megbízást a tanszék vezetésére. Vezetőként folytatta Dr. Tarján Iván professzor korábbi tanszékvezető eredményes munkáját, a korábbi sikeres oktatási és kutatási területek megtartása és fejlesztése mellett, felismerte a szakterületén jelentkező kihívásokat, új irányokat is. Munkatársaival összefogva, jelentős változásokat indított el mind az oktatás, mind a kutatás, a hazai és nemzetközi kapcsolatok területén is. A klasszikus ásványelőkészítési ismeretekre, a mechanikai eljárástechnika tudományos alapjaira építve, fejlesztette a tanszék oktatási és kutatási területét a másodnyersanyagok, a hulladékok kezelése-hasznosítása, a környezeti eljárástechnika megalapozása és kiterjesztése irányába. Ez a változás tette lehetővé, hogy ma a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet a körforgásos gazdaság hazai kiépítésének egyik alappillére. E területen elért oktatási, kutatási eredmények és tapasztalatok alapján, a másodnyersanyagok előkészítése területén, kiterjedt együttműködéssel rendelkező, nemzetközileg is elismert kutatóközpont.

Az oktatás és kutatás mellett fokozott figyelmet fordított hallgatói, munkatársai szakmai-tudományos fejlődésére is. Az újrendszerű doktori (PhD) képzés kereté-

ben Bányamérnöki Karon 1992-ben megalakult Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola munkájában, szakterületén vállalt jelentős feladatokat. Eredményes munkáját bizonyítja, hogy vezetésével számos fiatal kutató szerzett PhD tudományos fokozatot, akik ma az Intézet meghatározó vezető oktatói, itthon és külföldön dolgozó elismert sikeres szakemberek.

Tisztelt Professzor Úr!

Születésnapja alkalmából kívánok Önnek, mindenekelőtt jó erőt és egészséget, hosszú életet, magánéletében sok örömet és boldogságot, valamint további sikereket szakmai-tudományos pályáján. Kérem munkájával, javaslataival továbbra is segítse munkatársait, az intézet, a kar az egyetem közösségének eredményes munkáját.

Miskolc, 2026. január 9.

Prof. Dr. Horváth Zita  
a Miskolci Egyetem rektora

**KÖSZÖNTŐ PROF. DR. CSÓKE BARNABÁS EGYETEMI TANÁR  
80. SZÜLETÉSNAJÁRA**

MUCSI GÁBOR

*Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar  
gabor.mucsi@uni-miskolc.hu*

Tisztelt Professzor Úr, Kedves Ünnepeitünk!  
Tisztelt Hölgyeim és Uraim, Kedves Kollégák, Barátok!

Nagy tisztelettel és őszinte örömmel köszöntöm Csóke Barnabás professzor urat 80. születésnapja alkalmából a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Kara nevében. Ez a jeles évforduló nemcsak az idő múlásáról szól, hanem egy gazdag életútról, amelyet a tudomány, az oktatás és az emberi példamutatás iránti elkötelezettség határozott meg.

Köszönöm azt a több évtizedes áldozatkész és magas színvonalú munkát, amellyel hozzájárult és hozzájárul még ma is, a Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet szakmai, tudományos és oktatási tevékenységéhez, hazai és nemzetközi kapcsolataihoz, sikereihez. Kutatóként, oktatóként, intézeti vezetőként végzett színvonalas munkájával elősegítette egyetemünk fejlődését, stabilitását, az alkotó munkahelyi légkör kialakulását és megszilárdítását. Kiemelkedő tudományos eredményeivel nemzetközi tekintélyt szerzett, segítve ezzel is egyetemünk elismertségét itthon és külföldön egyaránt.

Fontos kiemelni, hogy az elmúlt évtizedekben több mint 200 hazai és nemzetközi KFI ipari és pályázati kutatásnak volt a vezetője. Az általa kifejlesztett eljárások és technológiák eredményeként a hazai hulladékfeldolgozó ipar sokat profitált, ami nemzetgazdasági eredménnyel is járt. A szakirodalmi tevékenysége során eddig több mint 300 publikációja (könyv, könyvrészlet, folyóirat cikk, előadás) látott napvilágot.

Professzor Úr pályája során nemzedékek tanulták meg Öntől, mit jelent a szigorú szakmai igényesség, a következetes gondolkodás és a tudás iránti alázat. Előadásai, publikációi és szakmai közéleti szerepvállalása mind hozzájárultak ahhoz, hogy az ásvány- és hulladék-előkészítés szakterülete itthon és nemzetközi szinten is gazdagodjon. Munkássága hidat teremtett elmélet és gyakorlat között, miközben mindig szem előtt tartotta az emberi értékeket.

Külön szeretnénk megköszönni azt a figyelmet és türelmet, amellyel hallgatóit és fiatalabb kollégáit segítette. Sokan valljuk, hogy nemcsak tudást kaptunk Öntől, hanem irányítót is: példát arra, hogyan lehet egyszerre következetesnek és emberségesnek lenni, hogyan lehet kérdezni, kételkedni, és mégis építeni.

A 80 év bölcsessége ma egy ünnep és inspiráció mindannyiunk számára a folytatáshoz. Kívánjuk, hogy Professor Urat továbbra is kísérje jó egészség, alkotókedv és az a derű, amely mindig erőt adott környezetének.

Engedje meg, hogy valamennyiünk nevében szívből gratuláljunk, és köszönetet mondjunk mindazért, amit a tudományért, az oktatásért és értünk tett.

Isten éltesse Csőke Barnabás Professor Urat erőben, egészségben, szeretetben!

Miskolc, 2026. január 9.

Jó szerencsét!

Prof. Dr. Mucsi Gábor  
dékán

**KÖSZÖNTŐ PROF. DR. CSÓKE BARNABÁS EGYETEMI TANÁR  
80. SZÜLETÉSNAJÁRA**

NAGY SÁNDOR

*Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar  
Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet  
sandor.nagy@uni-miskolc.hu*

Tisztelt Professzor Úr!

Tisztelt Hölgyeim és Uraim, Kedves Kollégák, Meghívottak!

Születésnapja alkalmából szeretettel köszöntöm az intézetünk nevében! Ez a nap jó lehetőség arra, hogy megálljunk egy pillanatra, és kifejezzük köszönetünket mindazért, amit tanárként, kollégaként, vezetőként adott nekünk. Az együtt töltött évek során sokat tanulhattunk Öntől – nemcsak a szakmai kérdésekben, hanem abban a gondolkodás és szemléletmódban is, amelyre ma is támaszkodunk. Szavai, kérdései és hozzáállása tartós nyomot hagytak bennünk.

Professzor Úr 1969-ben ösztöndíjas gyakornokként kezdte meg egyetemi tevékenységét a Tarján Gusztáv professzor által vezetett Ásványelőkészítési Tanszéken. 1995-2006 között az Eljárás technikai tanszék vezetője, 2006-2010 között a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás technikai Intézet intézetigazgatója volt. 2016-tól nyugdíjasként, Professor Emeritusként továbbra is jelentős mértékben segíti az intézet szakmai előrehaladását.

Kutatásai során elsődleges nyersanyagok, majd idővel másodlagos nyersanyagok feldolgozásával is foglalkozik. Az intézet másodlagos nyersanyagok kutatásának az irányába történő erőteljes nyitása Professzor Úr vezetése alatt történt, teljesedett ki, amely terület ma már több mint 80 %-át adja az intézet ipari megbízásainak.

Hallgatóként szakmai tantárgyak keretében találkoztam Professzor Úr előadásaival, a tantárgyak technológiai szemlélete már akkor lenyűgözött, ez által hamar megszerettem ezt a területet. A szervezett üzemlátogatások is rávilágítottak a terület fontosságára, a jelentős ipari kapcsolatokra. Fiatal kollégákat – ahogyan annak idején engem is - mind primer mind szekunder nyersanyagfeldolgozás területekre, kihívásokra bevezetett Professzor Úr, amiért ma is nagyon hálás vagyok, ill. hálásak a kollégák.

Szemléletmódja a problémák komplex kezelésével, szisztematikus vizsgálatokra épített kutatási módszere, innovatív megoldásai számtalan hallgató, mérnök pályá-

ját alapozták meg, és számos vállalat, így a nemzetgazdaság számára is adtak megoldást a legkülönbözőbb anyagáramok feldolgozása tekintetében. Bizonyítja ezt a közel 250 ipari megbízásban és számos pályázat megvalósításában való – leggyakrabban témavezetőként történő - részvétele. Mind a mai napig nagy hangsúlyt fektet Professzor úr az új megoldások megismerésére, az aktuális szakirodalom áttekintésére, ipari kapcsolatok ápolására. A 2025-ös esztendőben is több ipari megbízásos munkába kapcsolódott be, melyet az intézet nevében is köszönök, és számítunk további segítségére!

Kívánunk Önnek jó egészséget, kiegyensúlyozott mindennapokat, és sok örömet azokban a dolgokban, amelyek most és a jövőben is fontosak az Ön számára! Isten éltesse!

Miskolc, 2026. január 9.

Jó szerencsét!

Dr. Nagy Sándor  
intézetigazgató

**KÖSZÖNTŐ PROF. DR. CSÓKE BARNABÁS EGYETEMI TANÁR  
80. SZÜLETÉSNAJÁRA**

FARKAS GÉZA  
*Perlit-92Kft.*  
*perlit92@t-online.hu*

Tisztelt Csóke Professzor Úr! Kedves Barátom!

Egy öreg kollégától kérdeztük, - mert Ő is elérte a nyolcvan évet - milyen érzés szépkorúnak lenni. A következő választ adta: mondjatok csak egyetlen egy dolgot, hogy mi a jó abban, hogy 80 éves vagyok. A következő választ kapta: kedves barátom, „hogy megélted viszonylag egészségben és szellemi frissességben”. Én se mondhatok mást.

Kedves Barátom, kicsit menjünk vissza az időben. Az Országos Érc és Ásványbányák Hegyaljai Műveinél a 70-es években kineveztek véletlenül a gépészeti és tervezési osztály vezetőjének. Egy alkalommal szólt Szép Endre főmérnök, hogy itt lesznek holnap a Miskolci Egyetem, Ásványelőkészítési Tanszékétől a kollégák, aztán kiderült, hogy Te jöttél, mint az egyetem adjunktusa. Bementünk a főmérnökhöz és megbeszéltük, hogy 3-4 hétig itt fogsz velem dolgozni tanulmányúton. Engem pedig 4 hétre felmentett a munkám alól. Végig jártuk a mádi őrlőket, például az egyes őrlőben 9 Prall működött közel 60 e. tonna bentonit finom őrleményeket gyártottunk. A hármas őrlőben a gyűrűs malmokon istenmezei bentonitot és királyhegyi kaolint őrltünk. A kettős őrlőben pedig akkor tértünk rá a zeolitok őrlésére. Végig jártuk Szegiben a papíripari kaolinok gyártását, elmentünk Pálházára a perlit őrlemények tanulmányozására. Voltunk Erdőbényén a kovaföld őrlemények előállításánál. Ez egy kis történelem, a Magyar Ásványbányászatról.

Kedves Barna, megmondom őszintén, nem emlékszem, hogy mi mindenről beszélünk, mert olyan régen volt. Egy dologra emlékszem, hogy azt mondtad, hogy neked érdemes lenne az ásványelőkészítés tudományával foglalkozni. Először nem gondoltam, hogy én ezzel fogok foglalkozni, mert én a hegesztés tudományával foglalkoztam. Svájcban a CASTOLIN - EUTECHNIK Intézetben foglalkoztam több hónapon keresztül metallográfiával és felrakó hegesztéssel.

Jóval később bementem hozzád a Tanszékre és bementünk Dr. Tarján Iván Professzor Úrhoz. Őt már régebről ismerem, mert tanított engem szivattyúk, szellőztetők és kompresszorok tantárgyra. Azt vettem észre, hogy Dr. Tarján Professzor Úrral Te jó kapcsolatban voltál, egyébként is láttam, hogy egy jó csapat van, Böhm

Jóska is ott volt a Tanszéken. Többszöri beszélgetés során beszéltem veled a Görög Malmokról és annak a szakirodalmáról. Valamint segítettél, hogy bekapcsolódhattam a Tanszék munkájába és Pethó Professor Úrral is megismerkedhettem. Jóval később a 90-es években beszélünk arról, hogy a Jászberényi Aprítógépgyár megszűnt és kellene egy modern hengeres törőt építeni. Meg volt a műszaki feltétele Pálházán, hogy egy modern hengeres törőt építsünk, amely számításában sokat segítettél. Egyben felhívtad a figyelmemet, hogy Antal Gábor, mint ezermester mérnök a hidraulikában sokat tudna segíteni. Volt egy rövid időszak a 2000-es évek elején, hogy segítséget adtál a Perlit Előkészítőmű felülvizsgálatában. Ezzel megteremtettük Európa egyik legmodernebb Perlit Előkészítőművét. Közben kialakult a baráti kapcsolat, amely a mai napig is tart.

A 80. születésnapod alkalmából köszönöm a segítségedet, jó egészséget és hosszú életet kívánok!

Pálháza, 2025. december 18.

Dr. Farkas Géza  
c. egyetemi docens  
Perlit-92 Kft. ügyvezető igazgató

**DR. CSÓKE BARNABÁS ARANYOKLEVELES BÁNYAMÉRNÖK  
SZAKMAI PÁLYAFUTÁSA  
„Út ahonnan elindult és ahova eddig elért”**

összeállította BÖHM JÓZSEF

*Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar  
Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet  
ejtbohm@uni-miskolc.hu*

1946. január 6-án született Sajószentpéteren üveggyári munkások gyermekeként, édesapja -Csőke Barnabás- fia születése után bányász lett, vājárként dolgozott a borsodi bányákban. 4 testvére született: Irén, Margit, Julianna és Pál, szükség volt a nagyobb bányász keresetre. Édesanyja, született Tóth Irén, ekkoriban főként a gyerekek ellátásával, nevelésével foglakozott. A szülők legfontosabbnak a tanulást, a tudást tekintették, és minden tőlük tehetőet megtettek, hogy gyermekeik gimnáziumban tanuljanak tovább. A Sajószentpéteren az általános iskolában folytatott alaptanulmányok után a testvérek közül három a miskolci Földes Ferenc Gimnáziumban érettségizett, egy pedig miskolci Kossuth Lajos Gimnáziumban. Csőke Barnabás a középiskolai tanulmányait 1960-64 között a miskolci Földes Ferenc Gimnáziumban folytatta, majd az érettségi után, a miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen Bányamérnöki Karára nyert felvételt. A bányaművelő szakon folytatott tanulmányai alapján a Bányamérnöki oklevelét 1969-ben szerezte meg. Felsőjét Csőke Barnabásné (sz. Fandák Erzsébet) még 8. osztályos tanulóként ismerte meg 1960-ban a Bányász Lakótelepi újonnan épített 3. sz. Állami Általános Iskolában, ahol új tanulóként fejezték be a 8. osztályt. Miután felsége az Egri Tanárképző Főiskolán rajz-földrajz tanárként 1968-ben befejezte tanulmányait, összeházasodtak.

*Szakmai pályafutás főbb adatai:* A választott szakmáját -az előkészítéstechnikát- már korán, még egyetemistaként megszerette. Már hallgatóként TDK dolgozatot készített a rudabányai pátvasérc nedves dúsítás témakörben, amelyben két diáktársa Ulrich József és Józsa Sándor is közreműködött. A kutatásuk eredményét az egyetemi TDK konferencia után, 1969-ben konzulens tanárával -Dr. Tompos Endrével- az OTDK-án is ismertethette. 1969-ben ösztöndíjas gyakornokként kezdi meg egyetemi tevékenységét a Tarján Gusztáv professzor által vezetett Ásványelőkészítési Tanszéken. 1976- műszaki egyetemi doktor. 1986- a műszaki tudomány kandidátusa fokozatot szerzett, 1998 Dr. habil. Beosztásai: 1969-1970-ig ösztöndíjas gyakornok az Ásványelőkészítési Tanszékén, 1970-1975-ig egyetemi tanársegéd, 1976-1986-ig egyetemi adjunktus, 1987-1997-ig egyetemi docens. 1988-ban vendégdocens a Freibergi Bányászati Akadémián. 1995-2000 között tanszékvezető. 1998-tól egyetemi tanár. 1997-2000-ig Széchényi Professzori Ösz-

töndíjas. 2001-2010-ig intézetigazgató. 2016-tól nyugdíjasként professzor emeritus.

*Kutatási területe:* Mechanikai eljárás technika, ásványi nyersanyagok és hulladékok előkészítése. Aprítási és szétválasztási folyamatok és berendezések tervezése, modellezése, optimalása. Közleményeinek száma: 304, amelyből 10 könyv és 21 könyvfejezet. Összes hivatkozások száma 581, szabadalom: 16 db.

*Oktatási tevékenysége* a kutatási területével egyező. Gyakorlatokat majd előadásokat tartott az ásványelőkészítés, mechanikai eljárás technika (aprítás-darabosítás) hulladék előkészítés területén a bánya-, az előkészítéstechnika-, a környezetmérnök, és a gépész-menedzser mérnökhallgatók számára. A doktorképzésben jelenleg a Nyersanyagkitermelés és -előkészítés, környezeti eljárás technika tématerület vezetője, az aprítás tantárgy jegyzője, közreműködik a hulladékgazdálkodási szakmérnöki képzésben (Miskolc, Pécs), mérnöktovábbképzésben. Tanszékvezetőként, folytatva a Tarján Iván professzorral közösen megkezdett oktatásfejlesztési utat, Bóhm Józseffel együtt, meghatározó szerepet töltött be a rendszerváltozással jelentkező tanszéki-intézeti kutató és oktató munka átprofilozásában, különösen az előkészítéstechnika és a hulladékgazdálkodás-előkészítés mérnöki tudományterület fejlesztésében, valamint a bolognai képzési mód előkészítéstechnika és környezetmérnök BSc alap és MSc szakok bevezetésében és fejlesztésében. A hazai egyetemek számára készített első hazai „Hulladékgazdálkodás” című, online elérhető tananyagának szerkesztője és számos fejezet szerzője, valamint a megjelent Hulladék előkészítés fizikai-mechanikai eljárás technikai alapjai c. könyv egyik szerkesztője, szerzője.

*Kutatás-fejlesztés.* A 245 tanszékre érkező ipari megbízás keretében hazai és külföldi nyersanyag, előkészítési-, kísérleti vizsgálatában (dúsítás, törés-örlés) vett részt kutatóként, többségében témavezetőként. Ezek közül kiemelendő a hazai recski mélyszinti ércesedés, bauxitok, mangánérc, bazalt, kaolinit, mészkő, homok témakörben végzett laborvizsgálatok, technológia és berendezés tervezési, fejlesztési feladatok. A magyarországi nyersanyagokkal végzett kutatási feladatok mellett hazai és nemzetközi cégek megbízása alapján (VIDUS, a Vegyipari Géptervező Vállalat az ALUTERV-FKI, az ALLIS TIDCO, Mineral System, SVEDALA) külföldi nyersanyagokkal, mint a spanyol rézércel, marokkói komplex ezüsttartalmú szulfidos érc, görög, vietnámi és jugoszláv bauxitok, orosz vasércel, bolgár kvarchomok, salakok- folytatott kutatásokat. A Zelezorudé Bane (Nizná Slaná, Szlovákia) a vasérc előkészítő üzemi technológiájának mérésekre alapozott optimalása, és folyamatszabályozásának kidolgozása. Tanársegédként kezdte meg a bauxit-kutatásokat: feltárta, hogy a bauxitok dúsíthatósága durva diszperz állapotban a bauxitok genetikája által meghatározott, Bárdossy által rögzített, szövetszerkezettől függ. Erről szóló értekezéseivel 1976-ban egyetemi műszaki doktor, 1985-ben MTA műszaki tudományok kandidátusa fokozatot szerzett.

*Aprítási tudományos iskola.* Az intézet Tarján Gusztáv professzorral kezdődő aprítási tudományos iskola hazai és nemzetközileg egyaránt elismert folytatója, aktív időszakában vezetője, mind az ásványos, mind a hulladék nyersanyagok aprítása területén. Jelentős felismerése volt, hogy a bauxitok lúgos, nagyhőmérsékletű őrlésekor a hagyományos módon, golyósmalomban végzett őrlési vizsgálat eredményeként kapott Bond-munkaindex és Hardgrove munka-index nem ad megbízható eredményt e különleges körülményekre. Bevezette a lúgos és nagyhőmérsékletű Bond-index meghatározási módszert, mind a két vizsgálati eljárás és eredményértékelés megfelelő módosításával, az eljárást Mucsi Gábor doktoranduszával közösen a rudasmalmi Bond-index esetére is kidolgozták. Az Antal Gábor, Mucsi Gábor és Faitli József alkotta kutató csapattal a Hardgrove-malom berendezést is továbbfejlesztették nagyhőmérsékletű őrlési vizsgálatokra, lehetőséget teremtve az őrlőüzemben őrlési munkaindex folyamatos mérésére, az őrlés folyamatszabályozására. Az eljárás és berendezés szabadalmat nyert, és a berendezést orosz és ausztrál cég meg is vásárolta. Kezdeményezője volt a nagyfinomságú (mikro, nano) terméket szolgáltatató, keverőmalmokkal kapcsolatos kutatások megkezdésének, aminek fontos eredménye 3 PhD doktori fokozatszerzés, Mucsi Gábor, Mannheim Viktória és Rácz Ádám doktoranduszok kutatásai révén. Számos újszerű, hulladék aprítóberendezés (kalapácsos shredderek, forgótárcsás nyíróaprítógépek, Alforgácsaprító ütő-nyíró, duroplaszt-aprítóhengercsor) eljárás-technikai tervezését végezte el, és közreműködött a gépek gyártásában és az üzembehelyezésben. Az aprítás, őrlés területén végzett PhD doktorainak száma: 7 fő, a fent említetteken kívül: Kocsis Edit, Gábel Viktória, Nagy Lajos.

Kutató-fejlesztő munkájában kiemelhető továbbá: a laboratóriumi kutatóeszközök, új félüzemi-üzemi berendezések kifejlesztése és megvalósítása: nagygradiensű mágneses szeparátor, pneumatikus áramkészülék, magneto-hidrosztatikus dúsító örvénycső, kompaktáló kísérleti mérőállomás, valamint előkészítő-berendezések tervezésére, az eljárások és gépek működésének értékelésére, optimalására alkalmas számítógépi program-család elkészítése, a tervezési gyakorlatban való alkalmazása. A brikettállítás témaköréből két fő -Nagy Sándor és Van Quyen szerzett PhD- tudományos fokozatot. Összes PhD doktorainak száma 9 fő.

Számos, a hulladékfeldolgozást célzó üzem megvalósításában működött közre, előkészítési technológiák (gép és eljárás) kidolgozásával, kutató-fejlesztő irányítóként, és közreműködött az üzemek megépítésében is: elhasznált háztartási kiskészülékek (Vertikál Zrt.), autó- és elektronikai-hulladékok shredderüzemi maradékok (ALCUFER Zrt.), szilárd települési hulladék szeletíven gyűjtött csomagolóanyaga (BIOKOM Kft. válogatómű), a vegyes kommunális hulladék mechanikai és mechanikai-biológiai előkészítése (Biokom Kft., Profikom Zrt., Vertikál Zrt., 3B Hungária Kft., AVE Kft kísérleti RDF üzemek), lúgos akkumulátor hulladék (Terra Center-), lejárt szavatosságú élelmiszerek, állati eledel konzerveket feldolgozó üzemek (TerraCenter Kft.-ATEV Zrt.) az anyagi alkotóik kinyerése érdekében.

*Pályázatok, témavezetés, projektvezetés:* 6 nyertes OTKA pályázat témavezetője, vagy résztémavezetője 2 EU-projekt (CIPA, EU6) és 4 kétoldalú nemzetközi projekt (3 MÖB-DAAD, 1 TÉT-Magyar-osztrák) 11 hazai projekt témavezetője, koordinátora vagy alprogram vezetője (2 NKFP, 4 GVOP 4 TÁMOP (Jedlik A)).

*Tudományos szervezetekben tagság, funkció:* MTA Bányászati Tudományos Bizottság Mechanikai Eljárástechnikai - Nyersanyagelőkészítési Munkabizottság titkára, társelnöke, elnöke (1997-99, 1999-, 2000-2011). A MAB Bányászati Szakbizottság Érc-, ásványbányászati és előkészítéstechnikai Munkabizottságának elnöke (1990-2003). Építőanyag és Biohulladék folyóirat Szerkesztőbizottsági tagja. Tagja az Országos Magyar Bányászati és Kohászati és Szilikátipari Tudományos Egyesületnek. Tag volt a Miskolci Egyetem Műszaki-természettudományi Habilitációs Bizottság (2012-ig), Műszaki Földtudományi Kar Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola Tudományági Tanácsának (-2020); „Nyersanyag kitermelés és -előkészítés, környezeti eljárástechnika” tématerület vezetője.

Az International Scientific Committee of the International Mineral Processing Congress tagja (1997-2012), International Advisory Committee of the International Mineral Processing Congress tag (2008-2012), több alkalommal kongresszusi szekció elnök. A szervező Bizottság elnöke European Symposium on Comminution and Classification Budapest (2006) nemzetközi konferenciának.

*Elismerései:* Miniszteri: Kiváló Munkáért (1979, 1986). Állami: Bányász Szolgálati Érdemérem Bronz fokozat (1984), Borbála Emlékérem (1999), Magyar Érdemrend Lovagkeresztje, Magyarország Köztársasági Elnöke (2016). Nívódíj, Magyar Kémikusok Egyesülete (2007). Mikoviny Sámuel Emlékérem, OMBKE (2007). „Környezetvédelmi Műszaki Felsőoktatásért” Magyar Mérnöki Kamara (2011). Pro Universitate, Miskolci Egyetem (2011). „Oklevél - Kitüntető Tudományos Díj”, Miskolci Akadémiai Bizottság (2015). Szerzői Nívódíj, BKL-Bányászat Szerkesztő Bizottság (2016). „Szilikátipar Tudományos Egyesület Örökös Tagja” (2016). „Tiszteletbeli Tag”, Magyar Mérnöki Kamara (2016). Sajószentpéter város Diszpolgára (2017). A Hulladékgyűjtésért, Energiaügyi Miniszter (2023).

## RUDAS- ÉS GOLYÓSMALMOK MODELLEZÉSE A MINŐSÉGSZABÁLYOZÁS ÉS MALOMTERVEZÉS ÉRDEKÉBEN

CSÖKE BARNABÁS

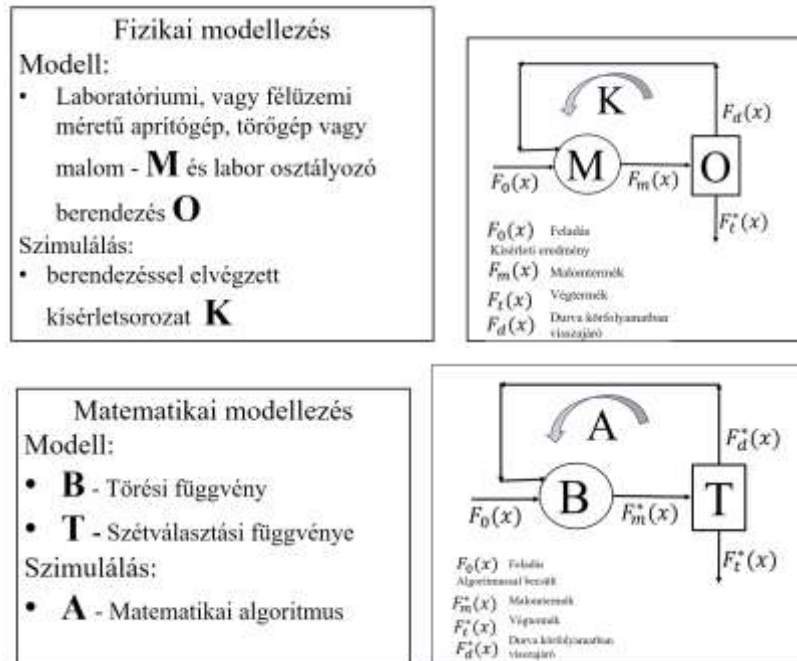
Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyagelőkészítés és  
Környezettudományi Intézet  
[barnabas.csoke@uni-miskolc.hu](mailto:barnabas.csoke@uni-miskolc.hu)

**Absztrakt:** A primer és szekunder ásványi nyersanyagokból (mész, dolomit, agyagok, perlit...) előírt tulajdonsággal rendelkező finom alapanyag-örlemények és az ércelőkészítésben érces ásványokat feltáró örlemények gyártási folyamatában kiemelkedő szerepük van a dobmalomoknak, különösen a golyós- és rudasmalomoknak. E malmokra jellemző a relatív kis hossz/átmérő ( $L/D < 2$ ) arány, emiatt a malmokban, ill. a malom-osztályozó körfolyamatban igen rövid idő alatt egyensúlyi helyzet áll elő (kvázi stacioner folyamat). Hasonló a helyzet a kúpos törőkben a teljesen kitöltött törőtér és a körfolyamat tekintetében. Ez lehetővé teszi, hogy a modellt az egyensúlyi helyzetre alapozzuk, azaz a törési folyamatot egyensúlyi helyzetek sorozatával írjuk le. E törő- és őrlőberendezésekre jó matematikai megoldás a mátrixok alkalmazása. Erre vonatkozóan a hazai magyar nyelvű irodalomban két tanulmány utal (Beke, 1972, Keviczky et al., 1988), valójában részletes kifejtés nélkül, ugyanakkor igen jelentős előnye lehetne az örleménygyártásban a golyós és rudasmalmokon kívül, a kalapácsos és kúpostörők esetében is. A módszert szlovák vasércbánya előkészítőművének (Csöke et al., 1996) kimérése és működésének optimalizálása tárgyú kutatófejlesztő munka keretében alkalmaztuk elsőként. A későbbiekben a törőkre vonatkozóan a mátrixmodell alkalmazását két nemzetközi konferencián, ill. a konferencia kötetben bemutattuk, amelyek az intézetünkben elérhetők (Csöke-Rácz, 1998; Csöke et al., 2008). Publikációs hiány a dobmalom esetén fennmaradt, amit jelen munkában pótlunk. Ez az ismertetésre kerülő modell, mint lehetőség korlátozott a hosszú malmokra, mint a cementipari klinkerőrlő hosszú malom, ahol a méretarány  $L/D=3-8$ . Ez esetben a szemcsefrakciók mennyisége időbeli változásának ismeretére van szükség, amit elsőrendű differenciálegyenlettel írhatunk le (dinamikus modell).

**Kulcsszavak:** érc- és ásványőrlő rendszerek, folyamatszabályozás, modellezés, folyamat-egyensúly,

### 1. FIZIKAI ÉS MATEMATIKAI MODELL AZ APRÍTÁSBAN

Az aprítás folyamatirányítása, - optimalizálása összetett feladat. Az aprítással előállított, a további felhasználásra alkalmas végterméket ugyanis rendszerint több - osztályozással egybekapcsolt - törési fokozattal állítják elő. Igen gyakran az aprítás az egyes aprítási lépcsőkben eltérő mechanikai igénybevétellel történik. A teljes aprítási-osztályozási folyamat tudatos irányítására, optimalizálására akkor van mód, ha a törési és osztályozási eljárások megfelelő modelljei rendelkezésre állnak. A modellek, a modellezés történhet fizikai vagy matematikai úton.



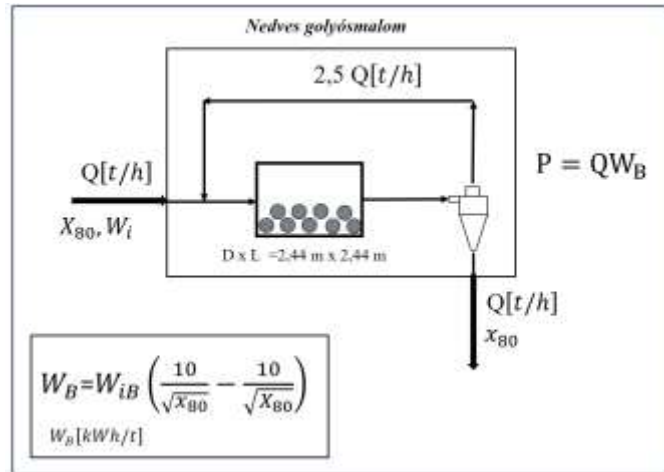
1. ábra

*Gépi törés fizikai és matematikai modellezés általános elve*

### 1.1. Fizikai őrlésmodell

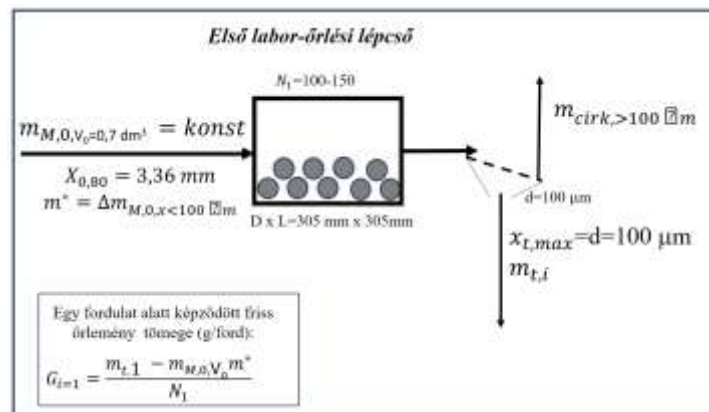
Az aprítás területén a legismertebb fizikai modell a Bond-modell, amely kezdetben golyósmalmi őrlés fajlagos energia szükségletének, és annak legfőbb tényezőjének, a  $W_{iB}$  – Bond-munkaindex meghatározása céljából vezette be Bond.  $W_{iB}$  elvében az anyag végtelen szemcsenagyságáról  $x_{80} \leq 100 \mu\text{m}$ -re történő golyósmalmi őrlés fajlagos munkaszükséglete.

Bond a  $W_{iB}$  anyagjellemző (őrölhetőségi munkaindex) meghatározása érdekében laboratóriumban modellezte azt a  $D \times L = 2,44 \text{ m} \times 2,44 \text{ m}$  belső méretű üzemi golyósmalmot, amelyben zárt körfolyamatú nedves őrlés valósult meg, és ahol a kész finom termék aránya a visszajáró durva termékhez 1 : 2,5 (2.ábra).



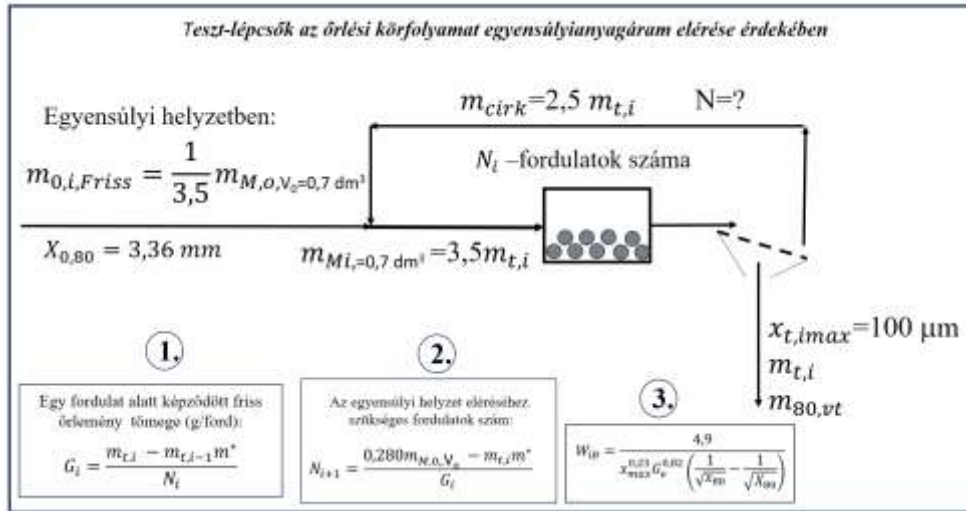
**2. ábra**  
Bond üzemi malommodell

Az üzemi malom fizikai modelljét a laboratóriumban a 3. ábra szemlélteti.



**3. ábra**  
Az üzemi malom laboratórium fizikai modellje, első tesztlépcső

A modell szerint az anyag örölhetőségre a körfolyamatos tesztörlés során az a  $G_e$  egy fordulat alatt képződött  $x_{80} \leq 100 \mu\text{m}$ -re szemcsetömeg a meghatározó jellemző, amelyet 1:2,5 körfolyamarány egyensúlyi helyzetében kapunk. Az előírt körfolyamat-anyagáram egyensúly néhány iteratív örlési lépcsőt követően következik be (4.ábra), amikor rendre a mért  $G_i$  örölhetőségi tényező (1) felhasználásával megbecsüljük azon  $N_i$  fordulatok számát (2), amely mellett az 1:2,5 körfolyamarány elérhető.

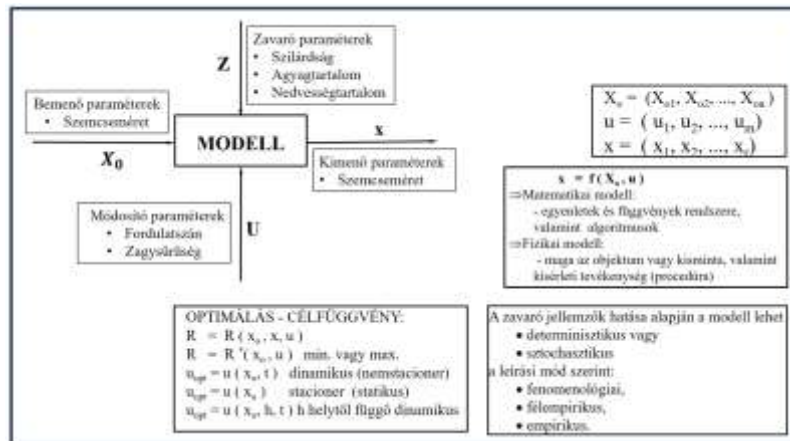


**4. ábra**

*A laboratórium tesztlépcsők (procedúra=fizika iteráció) az őrlési körfolyamat egyensúlyi anyagáram elérése érdekében (az utolsó 3 lépcsőben  $G_e = G_{n-2} = G_{n-1} = G_n = \text{konstans}$ )*

**1.2. Matematikai modell, folyamatirányítás-optimalás**

A nagy többmillió, több-tízmillió érc-, ásvány- és klinker-cement technológiai őrlőrendszerek tervezése és folyamatirányítása matematikai modelleken alapulnak (5.ábra).



**5. ábra**

*Modellezés és optimalás, folyamatszabályozás*

A technológia minden egyes folyamatát a külső jellemzőkből kiindulva ábrázolhatunk az 5. ábrán feltüntetett módon (Keviczky et al., 1988). A folyamatot meghatá-

rozó paraméterek négy csoportba sorolhatók: bemenő, kimenő, zavaró és módosító paraméterek. A beállított optimális bemenő és kimenő paraméterértékektől, a zavaró paraméterek térítik el a folyamatot, amit a módosító paraméterek segítségével állíthatunk új optimális állapotba, ha ismert a kimenő paraméterek függése a bemenő és zavaró paraméterektől, azaz ismert,  $\mathbf{x}=\mathbf{f}(\mathbf{X}_0, \mathbf{u})$  függvény (mátrix-függvény).

A matematikai leírás jellegzetes függvénycsoportjai:

- Elemi folyamatok egyenletei: általános törvényszerűségek.
- Mérleg egyenletek: anyag és energia mérlegek.
- Elméleti, empirikus és félempirikus összefüggések: a folyamat különböző paraméterei közötti összefüggések leírására.

Az optimalás célfüggvényekkel valósul meg, és az eredmény (célfüggvény maximuma vagy minimuma révén) a módosító paraméterek  $\mathbf{u}_{opt}$  optimális értéke.

## 2. A TÖRÉS FENOMENOLÓGIAI MODELLJE

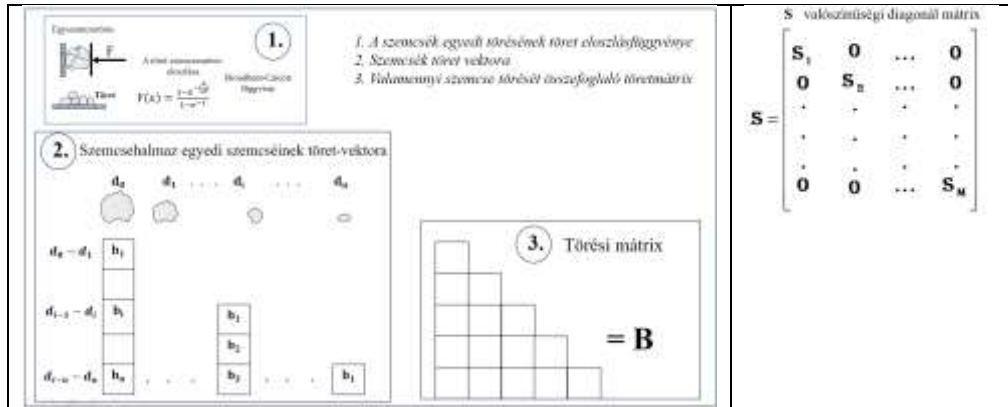
A törés folyamatának mechanisztikus modellbe (fenomenológiai modell) való foglalásának gondolata Epsteintől (1948, Lynch, 1977) származik. A gépi aprítás jellemzése az egyedi szemcsék törésének statisztikai elemzésén alapszik. Az egyedi szemcsék törését **elemi törési folyamatnak** nevezzük. A gépi törést két - elsőként Epstein által megfogalmazott- alapjelenség determinál: az igénybevételtől függő a törés, amelyet alapvetően az egyedi szemcsék törésével kapott töret  $\mathbf{B}(\mathbf{x})$  szemcseeloszlás jellemez, és a géptől és a szemcsemérettől függő törési valószínűség; ez utóbbit leíró  $\mathbf{S}(\mathbf{x})$  függvényt valószínűségi vagy szelekciós függvénynek nevezik. Broadbent és Callcott (1959) az  $\mathbf{y}$  méretű szemcsék töretének szemcseeloszlását  $\mathbf{B}(\mathbf{x},\mathbf{y})$  formában adják meg (6.ábra).

$$B(x) = \frac{1-e^{-\left(\frac{x}{y}\right)}}{1-e^{-1}} \quad 1)$$

Jelen munkában a fent jelzett okokból, mátrix modell alkalmazását csak a rudas és golyósmalmokra vonatkozóan (hiánypótlás) ismertetjük (számos más hasonló függvény is alkalmas lehet, pl. a Schumann - Gaudin).

### 2.1. Mátrix modell származtatása egyedi szemcsék törésével, szemcsehalmaz törése

A törési folyamat mátrix-modellbe foglalásának gondolata Broadbent- és Callcott-tól származik (1956, Lynch, 1977). A törési mátrix az egyedi szemcsék törési eredményének összefoglalása (6), amely összefoglalva megadja az eredeti meghatározott méretű egyes szemcsék töretszemcséinek a szabványos szemcseméret-frakciókba eső tömeghányadát (6.ábra).



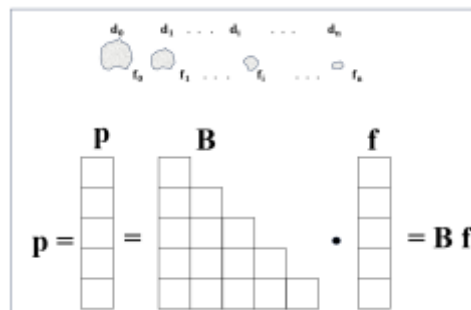
6. ábra

Mátrixmodell, a törési mátrix származtatása és törési valószínűségi mátrix

### Szemcsehalmaz törése

Ha a feladásban a szemcseméret-frakciók tömeghányadai  $f_0, f_2, \dots, f_i, \dots, f_n$ , akkor azok az **f feladás vektorba** írhatók fel, így a törésük eredménye:

$$p = B f \quad 2)$$



7. ábra

Szemcsehalmaz törési eredményének számítása a törési mátrix ismeretében

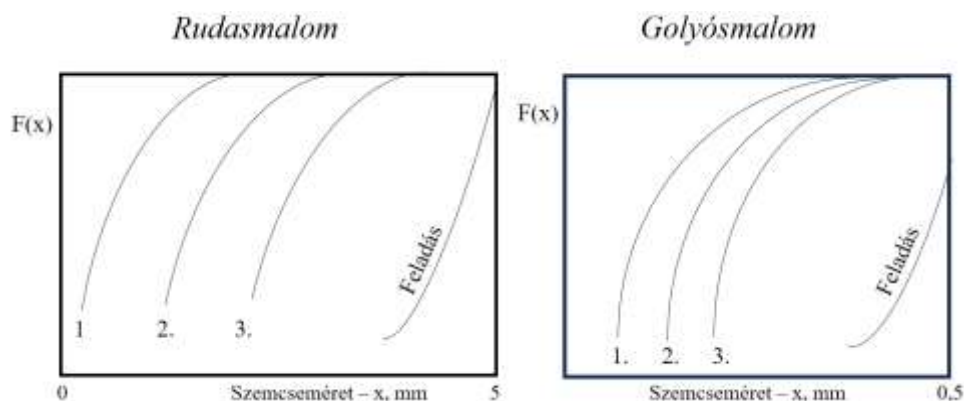
A törés eredményének a becslése az **S** törési valószínűségi diagonál-mátrix (6.ábra) figyelembevételével lesz teljes, mikor az eredmény a tört és a nemtört szemcsék összegeként, valamint a törési folyamat **n** ismétlődésének eredményeként kapjuk meg:

$$p = B S f + (I-S) f = X_B f, \text{ ahol } X_B = B S + (I-S) \quad 3)$$

$$\text{illetve } n \text{ ismétlődéssel } p_1 = X_{B1} f; p_2 = X_{B1} X_{B2} f \dots \quad p = \left[ \prod_{j=1}^n X_j \right] f \quad 4)$$

### 3. RUDAS ÉS GOLYÓSMALMOK TÖRÉSI FOLYAMATA MÁTRIXMODELLBEN

A törési folyamat ismétlődése történik a golyós- és rudasmalomban is, azonban a törési folyamat részletei jelentősen eltérnek egymástól. Ezt jól tükrözi a rudas- és golyósmalom őrleményének szemcseméret-eloszlása (9.ábra).



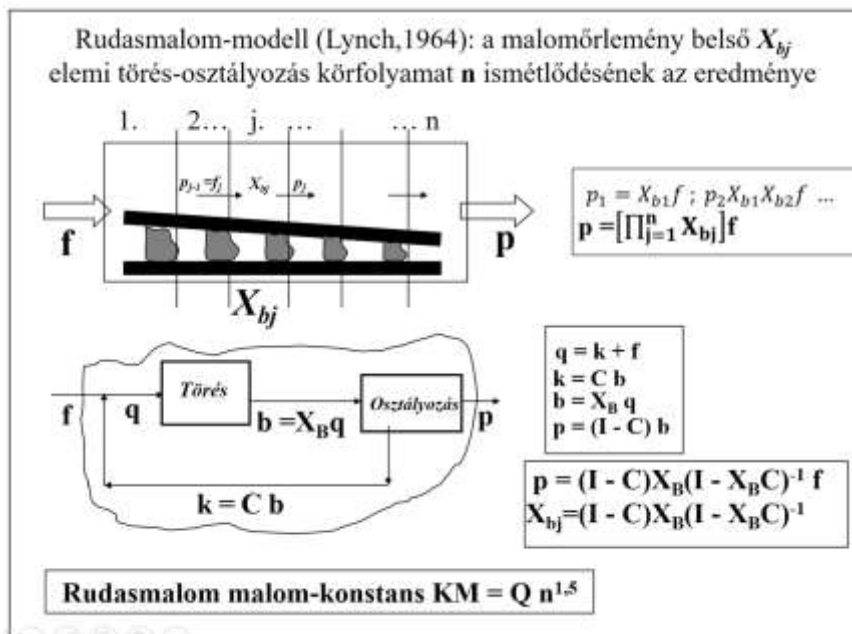
8. ábra

*Feladás és az őrlemény szemcseméret-eloszlás (vázlat)*

A rudasmalomban a törési lépcsők őrleményeinek maximális szemcsemérete lehatárolt, markánsan csökkenő, ami belső osztályozási folyamatra utal. A golyósmalomban ezzel szemben olyan őrlemény keletkezik, ami csaknem hordozza az eredeti feladás maximális szemcseméretét, és a törési lépcsők őrleményeinek maximális szemcseméretei igen közel esnek egymáshoz. Ez pedig nem osztályozásra, hanem arra utal, hogy az ismétlődő szemcsetörés az anyag csaknem teljes keveredésével folyik a malomban.

### 3.1. Rudasmalom

Feltételezzük, hogy a malom általában, és őrlési lépcsőkben is egyensúlyi helyzetben van (8.ábra): az elemi  $f_{j-1}$  feladás  $Q_{j-1}$  tömegárama adott lépcsőben, és az onnan távozó  $p_j$  őrlemény  $Q_j$  anyagárama megegyezik (ami a rövid malmok esetében jellemző, igen rövid idő alatt bekövetkező állapot). Rudasmalom esetében összetett törési folyamat zajlik, a szemcsék törését ugyanis osztályozás követi, tekintettel arra, hogy a tört szemcsék csak akkor képesek tovább haladni a rudak között, ha méretük kisebb, mint a rudak közötti aktuális rés. A belső törés-osztályozás modell Lynchtól (1964) származik. Következésképpen a malomőrlemény belső  $X_{bj}$  elemi törés-osztályozás körfolyamat  $n$  ismétlődésének az eredménye (8. ábra).



8. ábra

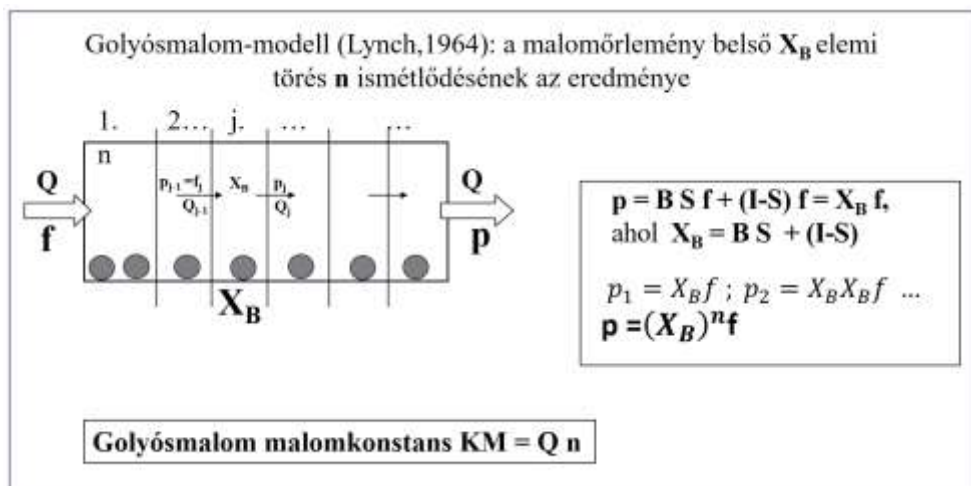
Rudasmalom mátrixmodell

Továbbá fontos az a felismerése, hogy a malmon áthaladó szilárd  $Q$ (t/h) anyagáram és az őrlési  $n$  lépcsők számának (pontosabban  $n^{1,5}$ ) szorzata konstans, amit **KM** malomkonstansnak nevezett el. A malomkonstans meghatározása olyan módon történik, hogy a fizikai malmot  $Q$ (t/h) feladással üzemelik, és egyensúlyi állapotban meghatározzák az őrlemény szemcseméret-eloszlását. Ezt követően, a mátrixmodellel megbecsülik, azt az őrlési elméleti lépcsőszámot, amellyel kielégítő pontossággal ugyanazon őrlemény szemcseméret-eloszlást kapjuk meg a számítással, mint amilyen a valódi őrlés során keletkezett.

A malomkonstans lehetővé teszi a malom őrlési finomságának tudatos szabályozását, nevezetesen a kívánatos őrlési finomsághoz szükséges  $Q$  malomterhelést, ill.  $n$  őrlési lépcsők számát meghatározzuk: nagyobb  $Q$  malomterheléssel csökken, a **KM** malomkonstans összefüggéséből számolt,  $n$  őrlési lépcsők száma, és ezzel (tekintettel, hogy a nagyobb anyagáram rövidebb ideig tartózkodik malomban, nő az anyagáram sebessége) az őrlemény durvább lesz, az őrlemény várható szemcseméret-eloszlást a modellel pedig megbecsülhetjük, és viszont kisebb  $Q$  malomterhelés nagyobb  $n$  az őrlési lépcsőszámra, ami finomabb őrleményre vezet (hosszabb ideig tartózkodik anyag a malomban).

### 3.2. Golyósmalom

Fenti vázolt okok miatt a golyósmalom törési-őrlési folyamata leegyszerűsödik, az őrlemény az  $X_B$  elemi törési folyamat  $n$  ismétlődésének az eredménye (9.ábra).



**9. ábra**  
*Golyósmalom mátrixmodell*

Itt is, a rudasmalomnál leírt módon, meghatározhatjuk a malomkonstanst. A malomkonstans meghatározásának módját a golyósmalom példáján a függelékben szemléltetjük.

#### 4. MALOMKONSTANS ÉS A MALOM MÉRETÉNEK BECSLÉSE

A malomkonstans lehetőséget kínál a malom méretének becslésére a hasonlósági törvény alapján (Scale-Up) ismert malom adataira támaszkodva. Jelen esetben az alkalmazás feltétele, hogy az őrlés feladásának és őrleményének 80- %-os szemcsemérete ( $X_{80}$  és  $x_{80}$ ), a malom fordulatszáma a kritikus fordulatszámhoz ( $e = n/n_{krit}$ ), valamint a malom őrlőtest  $\varphi$  töltési foka azonos legyen.

Ismert, hogy adott malom  $P_m(kW)$  teljesítőképessége és az adott  $Q(t/h)$  anyagőrlésének  $P_a(kW)$  őrlési teljesítményigénye (energiaigénye):

$$P_m \approx k D^{2,5} L, P_a = Q W_B \quad 5)$$

ahol  $D$  -a malomátmérő,  $L$  a malomhossz; a  $k$  golyósmalomra  $k=8,5$ ; rudasmalomra  $k=9,5$  (Tarján, 1981), ha golyós- és rudasmalomra  $e=0,72$ , ill.  $e=0,68$ ;  $\varphi=0,45 \pm 10\%$ ; ill.  $\varphi=0,40 \pm 5\%$ .

**W(kWh/t)** a Bond fajlagos őrlési munka:

$$W_B = W_{IB} \left( \frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad 6)$$

A malom feladásának tömegárama a malomkonstansból:

$$\text{golyósmalomra: } Q = \frac{KM}{n} \text{ és } \text{rudasmalomra: } Q = \frac{KM}{n^{1,5}} \quad 7)$$

Az 5) - (7 összefüggésekből golyósmalomra:

$$kD^{2,5}L = \frac{KM}{n} W_{IB} \left( \frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right);$$

rudasmalomra pedig

$$kD^{2,5}L = \frac{KM}{n^{1,5}} W_{IB} \left( \frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right)$$

összefüggéshez jutunk. A hasonlóság fennáll, ha érvényesek az alábbi összefüggések, golyósmalomra:

$$\frac{KM W_{IB}}{D^{2,5}L} = \frac{k n}{\left( \frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right)} = \text{konstans}$$

ill. rudasmalomra:

$$\frac{KM W_{IB}}{D^{2,5}L} = \frac{k n^{1,5}}{\left( \frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right)} = \text{konstans}$$

A hasonlóság feltétele, hogy a malom típusa, a feladásának és őrleményének 80%-os szemcsemérete ( $X_{80}$  és  $x_{80}$ ), a malom fordulatszáma a kritikus fordulatszámhoz ( $e = n/n_{krit}$ ), valamint a malom őrlőtest  $\phi$  töltési foka azonos legyen.

Ismert és a tervezett malomra vonatkozóan érvényes:

$$\frac{KM_1 W_{IB,1}}{D_1^{2,5} L_1} = \frac{KM_2 W_{IB,2}}{D_2^{2,5} L_2}$$

illetve

$$\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{2,5} \frac{L_2}{L_1} = \frac{KM_2 W_{IB,2}}{KM_1 W_{IB,1}}$$

összefüggés, ha  $L/D = k_m$ . A malmok  $k_m$  méretaránya azonban megegyezik, így az

$$\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{3,5} = \frac{KM_2 W_{IB,2}}{KM_1 W_{IB,1}}$$

egyszerűbb összefüggéshez jutunk.

## 5. ÖSSZEGEZVE

A mai számítógépes lehetőségek mellett nem okoz gondot a matematikai műveletek mátrixszal történő végrehajtása.

A fentiekből az is kitűnik, hogy a napi őrlőüzemi gyakorlatban is hasznos az üzemelő malmunk malomkonstansának mérésel-számítással való meghatározása, ami nemcsak a malom működésének szabályozásához, hanem ugyanazon anyagra a malomkapacitás (piac által indokolt) növeléséhez szükséges új malom méretének a megbízható tervezéséhez is segítséget nyújt.

**Függelék**

1)Példa: Határozzuk meg a  $B$  törési mátrix elemeit, 15-20, 10-15, 5-10, 2,5-5; 1,25-2,5; 0,63-1,25; 0,3-0,63; <0,3 mm szemcseméretfrakciókra,  $B(x) = \frac{1-e^{-\left(\frac{x}{y}\right)}}{1-e^{-1}}$  Broadbent-Calcott függvény érvényessége esetén ( $y=20$  mm).

Szemcseméret, mm	$B(x/y)$	$B_i=B(x_i/y)- B(x_{i-1}/y)$
15 - 20	1,00	<b>0,16</b>
10 - 15	0,84	<b>0,22</b>
5 - 10	0,62	<b>0,27</b>
2,5 - 5	0,35	<b>0,16</b>
1,25 - 2,5	0,19	<b>0,09</b>
0,63 - 1,25	0,10	<b>0,05</b>
0,3 - 0,63	0,05	<b>0,02</b>
<0,3	0,03	<b>0,03</b>

Töltsük ki az  $B$  5x5 mátrixot

$$\begin{array}{l}
 x, \text{ mm} \\
 >10 \\
 5-10 \\
 2,5-5 \\
 1,25-2,5 \\
 0,63-1,25
 \end{array}
 \left| \begin{array}{ccccc}
 \left[ \begin{array}{ccccc}
 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0,27 & 0,38 & 0 & 0 & 0 \\
 0,16 & 0,27 & 0,38 & 0 & 0 \\
 0,09 & 0,16 & 0,27 & 0,38 & 0 \\
 0,05 & 0,09 & 0,16 & 0,27 & 0,38
 \end{array} \right] = \mathbf{B}
 \end{array} \right.$$

2)Példa: Határozzuk meg a golyósmalom elemi  $\mathbf{X}_B = \mathbf{B} \mathbf{S} + (\mathbf{I}-\mathbf{S})$  törési mátrixát, ha  $S$  valószínűségi mátrix elemei a fenti szemcseméretekre,  $S_1 \dots S_5 : 1; 0,7; 0,2; 0,3; 0,25$ . (<0,63 mm:5,0 %)

$$\begin{aligned}
\mathbf{B} \cdot \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 & 0,38 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 & 0,27 & 0,38 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,16 & 0,27 & 0,38 & 0 \\ 0,05 & 0,09 & 0,16 & 0,27 & 0,38 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1,0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} 0,38 \cdot 1,0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 \cdot 1,0 & 0,38 \cdot 0,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 \cdot 1,0 & 0,27 \cdot 0,7 & 0,38 \cdot 0,2 & 0 & 0 \\ 0,09 \cdot 1,0 & 0,16 \cdot 0,7 & 0,27 \cdot 0,2 & 0,38 \cdot 0,3 & 0 \\ 0,05 \cdot 1,0 & 0,09 \cdot 0,7 & 0,16 \cdot 0,2 & 0,27 \cdot 0,3 & 0,38 \cdot 0,25 \end{bmatrix} \\
\mathbf{B} \cdot \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 & 0,27 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 & 0,19 & 0,08 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,11 & 0,05 & 0,11 & 0 \\ 0,05 & 0,06 & 0,03 & 0,08 & 0,1 \end{bmatrix} \\
\mathbf{S} &= \begin{bmatrix} 1,0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \end{bmatrix} \quad \mathbf{I} - \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,75 \end{bmatrix} \\
\mathbf{X}_B = \mathbf{B} \mathbf{S} + \mathbf{I} - \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 & 0,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 & 0,19 & 0,88 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,11 & 0,05 & 0,88 & 0 \\ 0,05 & 0,06 & 0,03 & 0,08 & 0,85 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

3)Példa: Határozzuk meg a golyósmalom konstansát, ha közvetlen malomfeladás  $Q=80 \text{ t/h}$ , és a méréskor a feladás szemcseméret-eloszlása az alábbi

x, mm	f
>10	25
5-10	35
2,5-5	20
1,25-2,5	10
0,63-1,25	5

A malomból kiérkező őrlemény őrlési finomság  $<0,63 \text{ mm}$ :  $65 \pm 5 \%$ .

Számítások a törési lépcsők növelésével:

$$\begin{aligned}
 n=1 \\
 p_1 = X_B f &= \begin{bmatrix} 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 & 0,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 & 0,19 & 0,88 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,11 & 0,05 & 0,88 & 0 \\ 0,05 & 0,06 & 0,03 & 0,08 & 0,85 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 25 \\ 15 \\ 10 \\ 10 \\ 5 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 0,38 \cdot 25 \\ 0,27 \cdot 25 + 0,57 \cdot 15 \\ 0,16 \cdot 25 + 0,19 \cdot 15 + 0,88 \cdot 10 \\ 0,09 \cdot 25 + 0,11 \cdot 15 + 0,05 \cdot 10 + 0,88 \cdot 10 \\ 0,05 \cdot 25 + 0,06 \cdot 15 + 0,03 \cdot 10 + 0,08 \cdot 10 + 0,85 \cdot 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 12 \\ 16 \\ 5 \\ 8 \end{bmatrix} \\
 &\qquad\qquad\qquad <0,63 \text{ mm: } 49 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n=2 \\
 p_2 = X_B p_1 &= \begin{bmatrix} 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 & 0,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 & 0,19 & 0,88 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,11 & 0,05 & 0,88 & 0 \\ 0,05 & 0,06 & 0,03 & 0,08 & 0,85 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 10 \\ 12 \\ 16 \\ 5 \\ 8 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 0,38 \cdot 10 \\ 0,27 \cdot 10 + 0,57 \cdot 12 \\ 0,16 \cdot 10 + 0,19 \cdot 12 + 0,88 \cdot 16 \\ 0,09 \cdot 10 + 0,11 \cdot 12 + 0,05 \cdot 16 + 0,88 \cdot 5 \\ 0,05 \cdot 10 + 0,06 \cdot 12 + 0,03 \cdot 16 + 0,08 \cdot 5 + 0,85 \cdot 8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 11 \\ 8 \\ 7 \\ 9 \end{bmatrix} \\
 &\qquad\qquad\qquad <0,63 \text{ mm: } 61 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n=3 \\
 p_3 = X_B p_2 &= \begin{bmatrix} 0,38 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,27 & 0,57 & 0 & 0 & 0 \\ 0,16 & 0,19 & 0,88 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,11 & 0,05 & 0,88 & 0 \\ 0,05 & 0,06 & 0,03 & 0,08 & 0,85 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 4 \\ 11 \\ 8 \\ 7 \\ 9 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} 0,38 \cdot 4 \\ 0,27 \cdot 4 + 0,57 \cdot 11 \\ 0,16 \cdot 4 + 0,19 \cdot 11 + 0,88 \cdot 8 \\ 0,09 \cdot 4 + 0,11 \cdot 11 + 0,05 \cdot 8 + 0,88 \cdot 7 \\ 0,05 \cdot 4 + 0,06 \cdot 11 + 0,03 \cdot 8 + 0,08 \cdot 7 + 0,85 \cdot 9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 7 \\ 10 \\ 8 \\ 9 \end{bmatrix} \\
 &\qquad\qquad\qquad <0,63 \text{ mm: } 67 \%
 \end{aligned}$$

Tehát  $n=3$ ,  $KM=Q$ ,  $n = 80 \cdot 3 = 240$

## IRODALOM

- [1] Bond, F.C.: The Third Theory of Comminution. AIME, pp.484-494 (1952)
- [2] Bond, F. C.: Berechnungsmethode zur Feinzerkleinerung. Aufbereitungstechnik, 1964. Nr.8. p.316-324 (1964)
- [3] Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P.T.: Process Engineering of Size Reduction. Ball Milling American Institute of Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York. (1984)
- [4] Mular, A.L. - Jergensen, G.V.: Design and Installation of Comminution Circuits. Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York. (1982)
- [5] Deister, R.J.: How to determine the Bond Work Index Using Lab Ball Mill Grindability Tests. Engineering Mining Journal.(1987)
- [6] Lynch, A. J.: Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimization Design and Control, Elsevier, Amsterdam-Oxford-London. (1977)
- [7] Mular, L. A.-Bhappu, R. B.: Mineral Plant Design AIME. New York, pp. 206. (1980)
- [8] Tarján, G.: Mineral Processing I. AK, Budapest. (1981)
- [9] Beke, B.: Örlőberendezések több osztályozóval. SZIKKTI Tudományos Közlemények. (35), Budapest (1972)
- [10] Kelly, E. G., Spottiswood, D. I.: Introduction to Mineral Processing. John Wiley and Sons, New York, pp.187. (1982)
- [11] Pethő, Sz., Csőke, B.: Hazai kőzetek Bond-munkaindexének meghatározása. Építőanyag (HU ISSN 00 13-970x), 35. évf., 1983.11.sz., 401-407 (1983)
- [12] Austin, L.G. - Klimpel, R.R. - Luckie, P.T.: Process Engineering of Size Reduction. Ball Milling American Institute of Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York. (1984)
- [13] Andersen - T.J. Napier-Munn: The influence of liner condition on cone crusher performance. Minerals Engineering. 1990., Vol. 3, No. 1/2, pp.105-116, (1990)
- [14] King, R.P.: Simulation - the modern cost-effective way to solve crusher circuit processing problems. International Journal of Mineral Processing, 29, pp.249-265. (1990)
- [15] Csőke, B., Pethő, Sz., Földesi, J., Mészáros, L.: Optimization of Stone-quarry Technologies. 8th European Symposium on Comminution. May 17-19,1994, Stockholm, Sweden, Preprints, Vol. II., 454-465

- 
- [16] Csőke, B., Rácz, J.: Estimation of the Breakage and Selection Function for Comminution in Hammer Mill. 9<sup>th</sup> European Symposium on Comminution, Albi (France), 8-10 September 1998, Preprints, 393-40. (1998)
- [17] Csőke, B.: Simulation and optimization of crushing technologies. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Polska Akademia Nauk, Kraków*. 1995/4, Tom 11. p. 491. (1995)
- [18] Csőke, B., Pethő, Sz., Földesi, J., Mészáros, L.: Optimization of Stone-Quarry Technologies. *ELSVIER. INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING* (ISSN 0-301-7516), 45-46(1996)
- [19] Keviczky, L. - Hilger, M. - Kolostori, J.: Folyamatidentifikáció, folyamatirányítási kutatások a szilikátiparban. *SZIKKTI Közl.* 82.sz. (1988)
- [20] Csőke, B.: Golyósmalmok fő méret- és üzemjellemzőinek meghatározása számítógéppel. *Építőanyag* (HU ISSN 00 13-970x), 2005/1, 39-42 (2005)
- [21] Csőke, B., Faitli, J., Mucsi, G., Laub, E., Szabó, M.: Modelling of Hydrocone Crushers for Controlling Product Quality. *Proceedings of XXIV. International Mineral Processing Congress 2008* (ISBN 978-7-03-022711-9), (Beijing). Volume 2.p.2545-2555. (2008)
- [22] Csőke B. et. al.: Betriebsoptimierung der Mahlanlage der Firma Železovudné Bane in Nižná Slaná, Bericht 4, Universität Miskolc, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik, (1996)

## **AZ ALAPVIZSGÁLATTÓL AZ ÜZEMKIMÉRÉSIG, NÉHÁNY PÉLDA A MECHANIKAI ELJÁRÁSTECHNIKA TUDOMÁNYTERÜLETÉN**

**FAITLI JÓZSEF**

*Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar,  
Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet  
jozsef.faitli@uni-miskolc.hu,  
ORCID: 0000-0002-4037-5208*

**Absztrakt:** Az emberi civilizáció nem létezhet nyersanyagokból előkészített alapanyagok nélkül, mert a fogyasztáshoz szükséges javakat vagy természeti, vagy antropogén anyagokból elsőként az előkészítéstechnika műveleteivel állítjuk elő. Csőke Professzor Úr a tématerület iskolateremtő professzora, aki a most 103 éves Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet minden aktív oktatójának és kutatójának a mestere is egyúttal. A 80. születésnap apropóján átgondoltam, hogy melyek voltak azok a területek, amelyeken elindított és valamilyen eredményre jutottam, és amelyekről az utóbbi időkben kevesebbet publikáltam. A mintavételezés területén szó lesz ismert tudásanyag újszerű rendszerezéséről, néhány – a véleményem szerinti - általános félreértelmezés tisztázásáról és az EPR-es TSZH mintavételezési metodika fejlesztésével kapcsolatos legújabb kutatási eredményekről a leválogatott 1.1. Élelmiszerhulladékok alkategória szennyezőanyag tartalmával kapcsolatban. Az üzemkimérés és számítógépes szimuláció tekintetében az izokinetikus pneumatikus csőszállítás mintavételezésével és gyűrűsmalom és aprító-osztályozó technológia mátrixmodell szimulációjával foglalkozom.

**Kulcsszavak:** *A mintavételezés 3+1 alapesete, egyesminta – átlagminta koncepció, izokinetikus mintavétel, vegyes települési szilárdhulladékok, törési mátrix.*

### **1. BEVEZETÉS**

Különbféle diszperz anyagalmazok feldolgozásának, - szakkifejezéssel előkészítésének - számos célja lehet. Például a vékonyra szelt sajt finomabb, a finomabb szemcsézetű porok másképp folynak, az összenyomott szemcsék szükséges szállítási térfogata kisebb. Az előkészítéstechnika legfontosabb célja azonban az, hogy a természeti és az antropogén nyersanyagokból olyan nagyfinomságú és nagy tisztaságú alapanyagokat gyártson, amelyek az emberi civilizációhoz szükséges javak előállításához szükségesek. Teljesen általános esetben, amikor egy új nyersanyaggal állunk szemben még nem tudjuk, hogy milyen alapanyagokat és mivel lehet azokat előállítani. Az előkészítőművek tervezésének, építésének és üzemeltetésének a következők a fő lépései. Elsőként egy mintavételezéssel nyert mintán alapvizsgálatot kell végezni, amely célja számos elkülönített szemcseméret-frakció anyagi összetételének a megmérése. Ebből már koncepciót lehet arról alkotni, hogy

milyen termékeket lehet a nyersanyagból gyártani, és hogy ahhoz milyen műveletekre lesz szükség. Ezt követően apríthatósági – feltárhatósági és dúsíthatósági vizsgálatokat kell végezni. Az apríthatósági vizsgálatok célja kettős, egyrészt szükség van az adott nyersanyagnak az adott berendezésben való fajlagos törési vagy őrlési energiaigényének a mérésére, másrészt különösen fontos az, hogy milyen szemcseméretnél táródnak fel a célként kiválasztott anyagi alkotók.

### 1. Alapvizsgálat

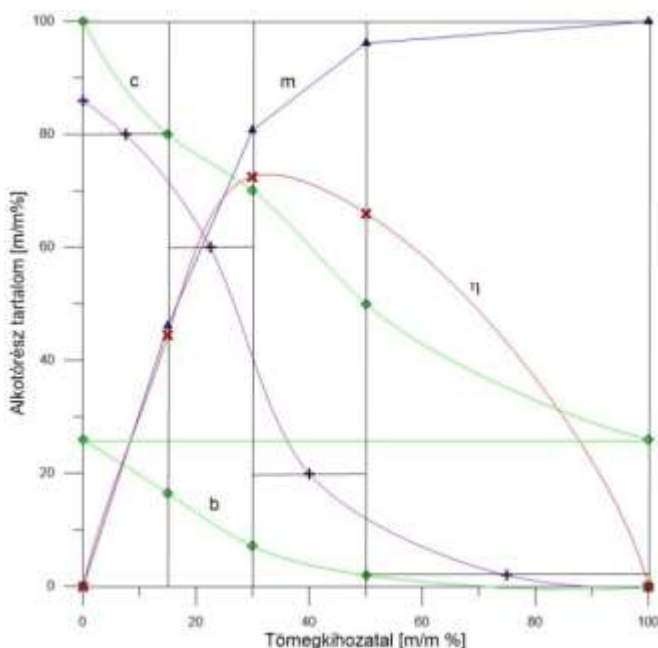
	Anyag 1.	Anyag 2.	Anyag 3.	Anyag 4.		
X1 ... X2 [mm]	5	10	10	5	30	m/m%
X2 ... X3 [mm]	0	0	20	20	40	m/m%
X3 ... X4 [mm]	20	5	5	0	30	m/m%
	25	15	35	25	100	m/m%

#### 1. táblázat

Példa egy alapvizsgálat eredményére. Vízszintesen összegezve a szemcseméret-frakció, függőlegesen összegezve az anyagkategória az eredmény.

### 2. Konceptió a potenciális termékekről és előkészítési technológiáról

### 3. Apríthatósági – feltárhatósági vizsgálatok, dúsíthatósági vizsgálatok



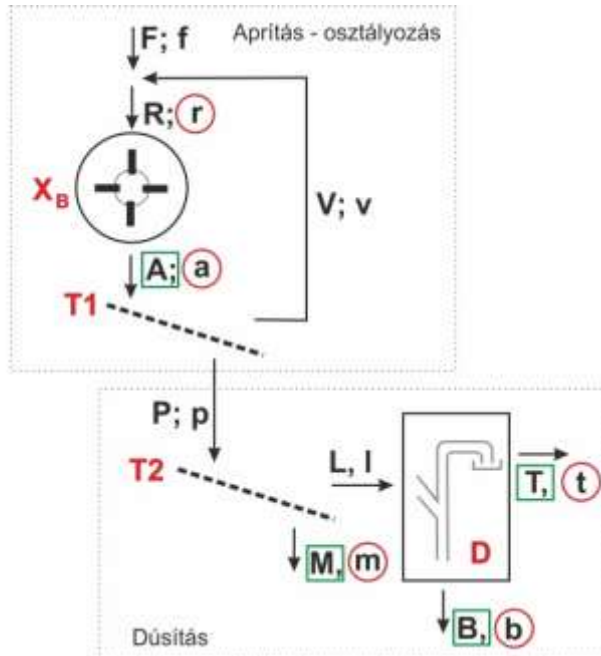
#### 1. ábra

#### Példa dúsíthatósági alapgörbére

Egy adott mintát több lépésben egy szeparátorra adunk fel, amikor a szétválasztási jellemzőt (pl. sűrűség, mágneses szuszeptibilitás, stb.) változtatjuk. A tömegkihozatal függvényében ábrázoljuk a koncentrációt és a meddő alkotórész tartalmát, a fémkihozatalt és a szétválasztási hatásosságot.

Ez alapján döntést lehet hozni, hogy a technológiában milyen értékre állítsuk be a szétválasztási fizikai jellemzőt. Az alapgörbe alapján a tömegkihozatalokat, alkotórész tartalmakat és alkotórész kihozatalokat is ki lehet számítani a tervezett ipari állapotról.

### 4. A technológia eljárás-technikai tervezése



## 2. ábra

Példa technológiai folyamatábrára

Az ábrán egy beton-tégla-malter tartalmú építési-bontási hulladék feldolgozására alkalmas négy eljárásból (aprítás röpítő törőben, osztályozás vibrációs síkszítákon, dúsítás légáramkészülékben) felépülő technológia folyamatábrája látható. Az anyag-átalakításra szolgáló eljárásokat valamilyen logikus piktogram jelöli.

Célszerűen egy nyíl egy anyagáramot jelöl, a nagybetű az anyagáram tömegáramát, míg a kisbetű a legfontosabb minőségi jellemzőt jelöli. Mivel az első zárt aprító-osztályozó körfolyam célja egy adott szemcseméret összetételű P termék előállítása, ezért pl. az  $f$ ,  $r$ ,  $a$ ,  $v$  az adott anyagáram szemcseméret-hisztogramot jelöli,  $m$ ,  $t$  és  $b$  pedig alkotórész tartalmakat.

5. Az üzem megépítése (gépészet, villamosság, épület, stb.)

6. Beüzemelés, üzemkimérés

Az alapvizsgálatok elvégzését követően lehetséges a teljes technológia eljárástechnikai méretezése, amely tartalmazza minden berendezés típusát és fő méreteit, teljesítmény igényeit, az anyagáramok fő jellemzőit, a kihozatalokat és a termékek tervezett fő jellemzőit. Ezt követően egyéb szakmák feladatai következnek, mint pl. a gépészeti, villamossági és építészeti tervezés, amelyeket követően megtörténik a teljes üzem megépítése. Az előkészítéstechnika következő feladata az üzem beindítása és beállítása, azaz a beüzemelés, majd pedig az üzemeltetés. Tipikus az, hogy az üzemelő nyersanyagelőkészítő művekben csak a fontosabb elektromos és gépészeti paraméterek on-line mérése és a termékek és esetleg a bemenő nyersanyagok minőségének a mérése történik rendszeres mintavételezéssel. Ezért tipikus az, hogy a normál üzemelés mellett a fő aprító és szétválasztó berendezések valódi eljárástechnikai viselkedése nem ismert. Ezek megismerésére üzemkimérést kell végezni.


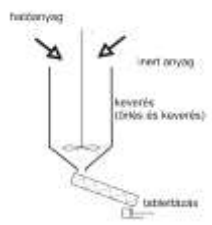
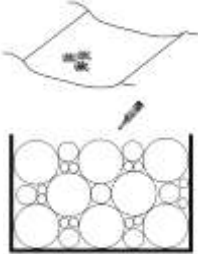
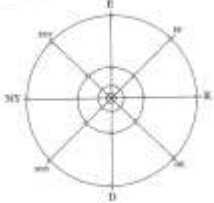
És hogy miért írtam le mindezt a bevezetőben, amely a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézetben folyó oktató- és kutatómunka jól ismert központi eleme és miért kell itt személyes hangvételt megütnöm? Azért, mert ez a konferenciakötet Csőke Barnabás Professzor Úr 80. születésnapjára készült! Átgondoltam azt, hogy melyek voltak azok a kutatási témák, amelyeken közösen dolgoztunk vagy pedig Professzor Úr kezdeményezésére kezdtem én el, és illeszkedik a bevezetőhöz, és amelyekről még viszonylag keveset publikáltam. Végzett bányagépészeti és villamossági mérnökként számomra irányváltást jelentett a technológiai jellegű kutatás és oktatás, azonban azt gondolom, hogy a kétféle szemlélet szinergikus alkalmazása igen előnyösnek bizonyult. Az első jelentős témakör a mintavételezés, amellyel akkor kezdtem el foglalkozni, amikor felkérést kaptam a tárgy oktatására az elmúlt évszázadban, továbbá akkor, amikor 2003-ban a hazai települési szilárdhulladékok (TSZH) mintavételezési módszertanának a kifejlesztésére létrejött szakmai csoportban dolgozhattam. Jelen tanulmányban a mintavételezéssel kapcsolatban két dologról lesz szó, egyrészt a tárgy oktatása során kialakult szemlélet néhány elemét szeretném bemutatni, másrészt az EPR-es (kiterjesztett gyártói felelősség) TSZH mintavételezési módszertan legújabb vizsgálatáról, a leválogatott 1.1. Élelmiszerhulladékok alkategória szennyezőanyag tartalmával kapcsolatos eredményeket ismertetem. A TSZH mintavételezési módszertanokról (szabványos, részletes, EPR-es) már számos tanulmány született (pl. Faitli et al., 2023). A települési szilárdhulladékok feldolgozására szolgáló berendezések, pl. a kombinált szeparátor és technológiák közös fejlesztéséről is számos cikk született már (pl. Nagy et al., 2023), ezekről itt nem esik szó. Csőke Professzor Úr vezetésével végeztünk komplett üzemkimérést az akkor még üzemelő berentei erőműben. Szintén a mintavételezéshez kapcsolódik a kifejlesztett izokinikus mintavevő berendezés. A Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet a vezetéssel végzett komplett üzemkimérést az Omya eger-felnémeti mészke előkészítőművében. Ennek az apropóját az adja, hogy jelen tanulmánykötetben Csőke Professzor Úr a cikkében, - többek közt - a rudasmalmok mátrixmodellben alapuló szimulációjával kapcsolatos kutatásait foglalja össze. Ezt a mátrixmodellt alkalmaztuk szerzőtársaimmal (Nagy Lajos, Czel Péter) a Pfeiffer 2800 C típusú gyűrűsmaalom esetében az üzemkimérés mért eredményei és a szimuláció összevetésére (Nagy - Faitli, 2015).

## **2. MINTAVÉTELEZÉS, MÓDSZERTAN ÉS ALKALMAZÁSI PÉLDÁK**

### **2.1. Oktatási anyagok rendszerezése**

A mintavételezés több évtizedes oktatása során, - nagyrészt a hallgatókkal való konzultációk és ipari kutatási munkák eredményeként – kialakult a tárgy újszerű rendszerezése. Ebben valójában csak ismert dolgok szerepelnek, azonban a közbeszédben általában és a szakmában is számos félreértés és kevert szóhasználat fordul elő, ezek közül szeretnék tisztázni néhányat. A téma részletes kifejtése a Csőke et al. (2024) tankönyvben található. A nyersanyag-mintavételezésnek az a célja, hogy a lehető legkisebb ráfordítással, mégis a lehető legjobb becslést adja a vizsgálat

tárgyát képező nyersanyag-halmaz kiragadott tulajdonságának a halmazbeli eloszlására. Ebből egyből látszik, hogy ez a mérnöki alkalmazás mennyire más, mint az alapot jelentő matematikai szemlélet a valószínűségszámítás és az egyéb, pl. közgazdasági, társadalmi, stb. alkalmazások. A valószínűségszámításban a minta elemeinek a száma (n) megközelítheti a sokaság elemeinek a számát, a nyersanyag-előkészítésben a minták tömege mindig sokkal kisebb, mint a részsokaság tömege. Egyszerű gazdasági okokból ki van zárva, hogy egy ipari nyersanyag-halmaz minden egyes szemcséjét mintavételezés útján megvizsgáljuk. A műszaki gyakorlatban a mintavételezést mindig a kiválasztott részsokaságon kell elvégezni, vagyis mindig rétegzett mintavételezést kell végezni, mert pl. az „almát és a körtét” külön-külön kell vizsgálni és a mintavétel mindig szisztematikus, soha nem teljesen véletlenszerű. Az alapsokaságot számos okból is részsokaságokra kell bontani, mert pl. olyan nagy a vizsgált nyersanyag-halmaz, vagy időben és térben elkülönülő részekből áll. Gyakorlati esetekben az mindig teljesen egyértelmű, hogy mi az a részsokaság, amelynek a minőségi jellemzésére egy mintavételezést végzünk. Bevezettem a mintavételezés 3+1 alapesetének a fogalmát (3. ábra). Az első alapesetben egy nyersanyag-halmaz adott tulajdonságának az átlagos értéke a kérdés, pl. a hulladékokból előkészített tüzelőanyagok (pl. RDF) legfontosabb tulajdonsága a fűtőérték, így pl. egy lehatárolt mennyiségű, azaz pl. egy kamion szállítmány RDF értékét az átlagos fűtőérték határozza meg. A vizsgált elméleti valószínűségi jellemző ez esetben a várható érték, amelyre jó becslést ad a mintaátlag.

1. eset	2. eset	3. eset	+1 eset
			
$M(x) \leftarrow \bar{x}$	$D(x) \leftarrow S_n^*$	$F(x) \leftarrow F_n(x)$ $f(x) \leftarrow f_n(x)$	pontminták

**3. ábra**

*A mintavételezés 3+1 alapesete*

A második alapesetben a részsokaság heterogenitása a kérdés. Erre jó példa a tablettagyártás. Amikor a gyógyszergyárban adott tömegű hatóanyagot (API) és inert anyagot megőrölnek, összekevernek és tablettáznak és egy „batch” esetében is sok ezer tablettát gyártanak a kérdés az az, hogy vajon minden tablettában ugyanannyi-e a hatóanyag mennyisége. Ha nincs egy tablettában hatóanyag, az placebo, ha viszont több van az akár mérgező is lehet a túladagolás miatt. Ez esetben a valószínűségi változó az az API alkotórész tartalma (koncentráció), a kérdéses elméleti valószínűségi jellemző a szórás, amelyet a korrigált empirikus szórással becsülhe-

tünk, mivel az kis mintaelem számok esetén is torzítatlan becslést ad. A mérnöki mintavételezés esetében a mintaelem szám mindig kicsi az említett gazdasági okok miatt. A harmadik alapesetben valóban a vizsgált tulajdonság részsokaságbeli eloszlása a kérdés. A szakkifejezés az „eloszlás”, azonban célszerű az „összetételi függvények” szakkifejezés átfogó használata. Az Intézet szakmai tevékenységéből származik a 3. ábrán látható sematikus rajz, amikor egy mesterséges folyó medrét megadott szemeloszlású vízépítési kövel kellett kiépíteni és a minőség ellenőrzésére az Intézet végzett mintavételezést. Amikor műtárgyat építenek szemcsés anyag-halmazból, a legjobb térkitöltést adó szemcseméret-eloszlás (Fuller görbe) esetében lesznek a műtárgy jellemzői általában kedvezőek. A 3. ábrán látható sematikus ábra ezt szemlélteti, azonban jól ismert az is, hogy amikor már nagyon finom szemcsékkel is feltöltöttük a rendelkezésre álló teret, még mindig lesz hézagterfogat közöttük, ezért a tréfás konklúzió „egy sör mindig belefér”. A tapasztalataim szerint még szakmai berkekben is erősen kevert az összetételi függvények elnevezése, használata, ezért a 2. Táblázatban látható rendszerezést javaslom.

**2. táblázat.** Az összetételi függvények rendszerezése

Minnek a függvénye?	Mi a vizsgált tulajdonság (valószínűségi változó)?	Függvény.	Mi szerint?
Részsokaság (jele: -) Minta (jele: n)	x, ρ, SF, κ, ...	$F(x) = P(\zeta \leq x)$ $f(x) = F'(x)$ H(x)	$H_i = k_i/n$ $H_i = \Delta m_i/m$ $H_i = \Delta V_i/V$ $H_i = \Delta A_i/A$ egyéb

A rendszerezést az „ $f_n(\rho)$  – vetületi felület szerint” jelölés és „empirikus sűrűség – sűrűségfüggvény a vetületi felület szerint” elnevezés magyarázatával illusztrálom. Az egyértelmű, hogy az elméleti összetételi függvények jelölésére a „jelölés nélküli” és a mért vagy empirikus függvények jelölésére az „n”, mint n elemű mintasorozat logikus. A tipikus hiba, amit gyakran elkövetnek, hogy összekeveredik a „tulajdonság-eloszlásfüggvény ( $F(x)$ )” és az „empirikus tulajdonság-eloszlásfüggvény ( $F_n(x)$ )” fogalma, azaz nem egyértelmű, hogy az adott összetételi függvény az a sokaságra vagy pedig a mintára vonatkozik-e. A bevezetőből kiderült, hogy a nyersanyagelőkészítésben szinte mindig csak az empirikus összetételi függvények ismertek. Kivétel lehet pl. az, amikor egy szenzorral egy szállítószalagon haladó szemcsés anyaghalmoz minden egyes szemcséjének a vizsgált tulajdonságát mérik, de az nem mintavételezés. Amennyiben egy mintát néhány előre elkészített sűrűségű nehézközeggel néhány sűrűség frakcióra bontunk szét, akkor a vizsgált valószínűségi változó a sűrűség. Az (elméleti) eloszlásfüggvény [ $F(x) = P(\zeta \leq x)$ ] és sűrűségfüggvény [ $f(x) = F'(x)$ ] elnevezése, definíciója és tulajdonságai, ill. a hisztogram jól ismertek a matematikai statisztikából. A hisztogram a minta jellemző függvénye, mert a valószínűségi változó szerint elkülönített frakciók, osztályok vagy kategóriák mért valószínűségeit jeleníti meg. És itt újra van egy nagy különbség a matematikai és a nyersanyagelőkészítési gondolkozásban! Egy elkülönített osztály

előfordulási valószínűségét a matematika leggyakrabban a relatív gyakorisággal ( $k_i/n$ ) fejezi ki. A nyersanyagelőkészítésben a szemcseszám-hányad, a tömeghányad, a térfogathányad és a felülethányad használata gyakori, azonban még számos más tulajdonságát is lehet mérni az elkülönített frakcióknak. A példában szereplő nehézközeggel szétválasztott minta sűrűségfrakcióinak a vetületi felület szerinti felülethányadát pl. úgy tudjuk megmérni, ha mindegyik frakcióról fényképet készítünk. A fényképeken képelemző programmal megmérjük a frakciók szemcséinek összesített vetületi felületét és így számíthatjuk a  $H_i = \Delta A_i / A$  értékeket, amelynek sokféle elnevezése (hisztogram, relatív gyakoriság, vetületi felülethányad, stb.) lehet. Szeretném kihangsúlyozni, hogy egy összetételi függvény megadása csak akkor egyértelmű, ha a 2. Táblázatban szereplő mind a négy paramétert megadjuk!

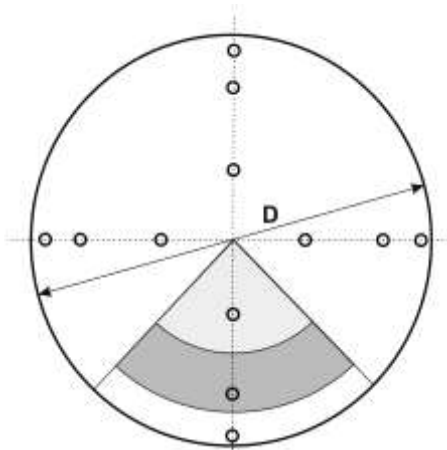
A mérnöki mintavételezésnek van egy negyedik, a +1 jelű esete is, ez pedig a szennyezés szétterjedés vizsgálata. Amikor az a kérdés, hogy egy szennyezett területre összesen mennyi szennyező került ki, akkor az az egyes alapeset. Ilyen esetben a lehatárolt területen (részsokaság) szisztematikus mintavételt (lásd később) kell végezni, az egyesminták összekeverésével képzett átlagminta feldolgozása és analízise után becslést lehet adni a szennyező koncentrációjának a várható értékére. Ettől teljesen eltérő feladat az, amikor a szennyező szétterjedésének a vizsgálata, - azaz merre halad a szennyezés – a cél, mert ilyenkor számos pontmintát kell venni és azokat külön-külön kell előkészíteni és elemezni.

A következő gyakran kevert szak kifejezés a minta vétele és a mintavételezés. A nyersanyag-mintavételezésnek öt fő lépése van, amelyek közül a második lépésben történik vagy az egyesminták vagy pedig a pontminták vétele (3. táblázat). A felkészülés célja a mintavételezési protokoll elkészítése, amely a megtervezett mintavételezés minden jellemzőjét tartalmazza. A továbbiakban az általános módszertan jól ismert elemeit már nem részletezem, még egy szintén gyakran félreértelmezett fogalmat, a reprezentatív minta fogalmát szeretném körbejárni.

**3. táblázat. A mintavételezés öt fő lépése**

<i>Felkészülés</i>	<i>Mintavétel</i>	<i>Mintaelőkészítés</i>	<i>Analízis</i>	<i>Kiértékelés</i>
Helyszíni szemle ( $X_{95}$ ). Szabványok keresése. Az elemző készülék ismerete. A teljes protokoll (mivel, mikor, mennyit...) tervezése. Ellenérdekelt felek: vevő – eladó, cég – felügyelőség. Eredménye a <b>mintavételezési protokoll</b> .	1...3 alapesetben: szisztematikus mintavétel a részsokaságból → egyesminta – átlagminta elv. +1 alapesetben: pontminták Eredménye az <b>átlagminta vagy a pontminták</b> .	Két stratégia: Aprítás – mintaki-sebbités elvű Szitálás – mintaki-sebbités elvű Mintavételezési nomogram: kezelendő minimális mintatömegek. Eredménye az <b>elemzési minta</b> .	Eredménye az <b><math>x_i</math> mért értékei</b> .	Eredménye a <b>becsült statisztikai jellemzők</b> .

Azt már korábban beláttuk, hogy mintavételezést mindig egy időben és térben egyértelműen lehatárolt nyersanyagalmazon, azaz a részsokaságon végzünk. A kérdés az, hogy a még mindig akár elég nagy tömegű részsokaságot hogyan kell mintavételezni. Az egyszerű véletlenszerű mintavételezés – mérnöki szempontból - biztosan nem ad jellemző mintát, mert nem veszi figyelembe például a szemcsés anyagalmazok viselkedésének a - mintavételezési szempontból legnagyobb nehézséget okozó - tulajdonságát, a szegregációt. Ezért az 1-3 mintavételezési alapesetek mindegyikében alkalmazni kell az általam egyesminta-átlagminta koncepciónak nevezett módszertant, amely azt jelenti, hogy a részsokaságot  $N$  darab virtuális térfogatelemre kell osztani úgy, hogy a részsokaság teljes térfogatát lefedjük és minden virtuális térfogatelem lehetőleg teljes keresztmetszetben harántolja a szegregációt. Minden virtuális térfogatelemből egyesmintát kell venni. Az egyesminta-átlagminta koncepció alkalmazása a különféle gyakorlati esetekben eltérő lehet, mindig igazodni kell a vizsgált részsokaság fizikai jellemzőihez. Gyakran elegendő a legegyszerűbb elv, amikor azonos térfogatú elemekre bontjuk a részsokaságot. A későbbiekben szó lesz a csővezetékben áramló poros gáz mintavételezéséről, ezért vizsgáljuk meg az MSZ 21853/3 szabvány útmutatását, azaz azt hogy egy nagytérű kéményben hogyan kell virtuális térfogatelemekre bontani a részsokaságot, másképp fogalmazva, milyen pontokba kell az izokinetikus poremisszió mérő szondát bedugni.



**4. Ábra.**

*Poremisszió mérése nagytérű kéményben*

A szabvány szerint a szondát a kémény 12 meghatározott pontjára kell bedugni (4. ábra). A 12 kitüntetett pont a cső két egymásra merőleges tengelyén helyezkedik el, amikor az egy sugárra eső 3 pont elhelyezése logaritmusos távolság léptékű. A kérdés az az, hogy ez esetben a kör alakú felület virtuális felbontása az azonos felületek elvét követi-e? A 4. ábrán látható, hogy nem, mert az alsó körívek azonos felületű 3 szeletének (árnyékolt részek) nem a közepén helyezkednek el a mintavételi pontok. Ez esetben a nagytérű cső virtuális térfogatelemekre való felosztásának áramlástanai magyarázata van.

Olyan 12 pontot kell találni, amelyekben ha megmérjük a helyi áramlási sebességet, akkor azoknak az átlaga egyezzen meg a keresztmetszeti átlagsebességgel, vagyis ez a felbontás a tipikus turbulens sebességprofil miatt ilyen. Azt feltételezhetjük, hogy ez esetben a 12 pontszerű helyen mért poremisszió átlaga megegyezik a teljes csőkeresztmetszetre vonatkozó átlagos poremisszióval.

A következőkben vizsgáljuk meg azt, hogy egy adott mintavételezési folyamat reprezentálja-e a teljes részsokaságot, és azt, hogy az így nyert átlagminta (1-3 alapeset) reprezentatív-e? Az első kérdésre az a válasz, hogy az egyesminta-átlagminta koncepció biztosítja azt, hogy a teljes részsokaságot szisztematikusan vizsgáljuk, ezért igen, ez a módszertan reprezentálja a teljes részsokaságot. A reprezentatív minta matematikai definíciója a következő:

$$F(x) = F_n(x)$$

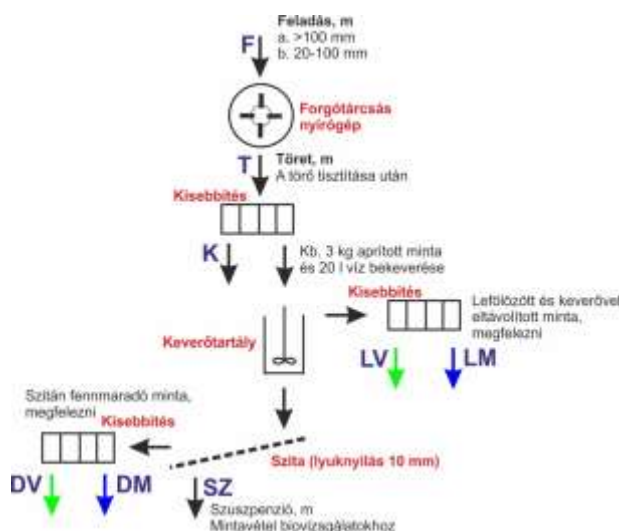
Vagyis egy minta – adott tulajdonságra - akkor reprezentatív, ha a vizsgált tulajdonság szerinti összetétele a mintának és a sokaságnak megegyezik. És ezt a mérnöki gyakorlatban soha nem tudhatjuk! A mintavételezés már említett célja - hogy a legkisebb ráfordítással, de a legjobb becslést adjuk – miatt, a minta tömege mindig jóval kisebb, mint a sokaságé és biztosan gazdaságtalan minden szemcse át-vizsgálása. Amennyiben mérnöki szempontból szisztematikusan végezzük a mintavételezést, például az egyesminta-átlagminta koncepció szerint arra törekszünk, hogy a sokaság minden eleme azonos valószínűséggel kerüljön a mintába, akkor a vett minták jellemzőek lesznek. Azt nem állíthatjuk, hogy reprezentatívok is lesznek! A mérnöki gyakorlatban ez a helytelen szóhasználat még szabványokban is előfordul, például így, hogy „vegyünk reprezentatív mintát”. A félreértést az okozza, hogy más területeken egyértelmű lehet mikor reprezentatív egy minta. Például, ha egy négyelemű sokaságban 2 fiú és 2 lány van, akkor a nemek arányának a tekintetében egy 1 fiúból és 1 lányból álló 2 elemű minta reprezentatív, ki lehet jelenteni, hogy reprezentatív mintán történt például valamilyen orvosi vizsgálat.

## **2.1. Az EPR-es TSZH módszertan szerint válogatott élelmiszerhulladékok szennyezőanyag tartalma**

A mintavételezéssel kapcsolatos módszertani fejlesztéssel és mérésekkel kapcsolatos új vizsgálat a települési szilárdhulladékok élelmiszer tartalmával kapcsolatos. Az un. EPR-es módszertan kidolgozásáról és számos országos hulladékanalízis eredményeiről már több alkalommal publikáltunk (Faitli et al., 2023 és 2024). A mért országos hulladékösszetételi adatokat számos szervezet, különféle célokra felhasználja. Többek közt ez alapján történik Magyarországnak az EU felé történő - a TSZH gazdálkodással kapcsolatos – jelentéstételi kötelezettségeinek a kielégítése, ill. a kiterjesztett gyártói felelősségi díjaknak az elszámolása a hazai TSZH hulladékgazdálkodást ellátó koncesszorral, a MOHU Zrt.-vel. A hazai szabványos, a részletes és az EPR-es TSZH mintavételezési módszertanoknak egyaránt fontos alapvetése az, hogy az egyidejű szitálás és válogatás során minden egyes adott fellelt állapotú szemcse esetében szemmel kell eldönteni azt, hogy melyik a legnagyobb tömegben jelenlévő anyagi alkotó és az annak megfelelő hulladék kategóriába kell a szemcsét leválogatni. Ilyen szempontból az élelmiszerhulladékok különleges esetet jelentenek, mert gyakran a csomagolással együtt kerülnek a VTSZH-ba (vegyes települési szilárdhulladék), a tipikus állapotuk miatt a tovább-

válogatás nem lehetséges a helyszíni méréseknél. A MOHU Zrt. felvetésére és az Energiaügyi Minisztérium támogatói okirata alapján (KGVHF/239/2024-EM\_SZERZ) ennek a témának a vizsgálatára módszertant és eszközöket fejlesztettünk és elvégeztünk egy vizsgálatot. Ennek a vizsgálatnak volt egy másik fontos célja is. Az közismert, hogy a hazai TSZH gazdálkodás továbbfejlesztésének aktuális kihívása az élelmiszerhulladékok szelektív begyűjtése és kezelése. A kezelésre a nedves technológia is opció lehet, az elvégzett alapvizsgálat egy nedves technológiai próbának is tekinthető. A mintavételre 2025. május 16-án, Miskolcon a MiReHu Kft. telephelyén került sor. A 2025 TAVASZ kampány, Miskolc M-XI (mérlegjegy száma: W17079-02509766) vegyes települési szilárdhulladék átlagminta helyszíni elemzése során vettük le egy-egy 120 literes edénybe az 1.1. Élelmiszerhulladékok >100 mm (a. mérés) és 20-100 mm méretű (b. mérés) szemcseméret frakcióit. Az 5. ábrán látható folyamatábra szerinti laboratóriumi elemzésre 2025. május 19-én került sor a Nyeranyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet laborjában. Az utóvizsgálatok ezt követően kb. 3 hónapig tartottak.

Egy adott szemcseméret-frakció elemzése a következő metodika szerint történt. A teljes élelmiszerhulladék mintát feladtuk az újonnan épített aprító berendezésre (a berendezés fejlesztésének leírása Rácz Ádám cikkében található). A törő alapos kitakarítását követően a töretet mintakisebbitettük, úgy hogy kb. 3 kg töret ment a következő fokozatra, a keverőtartályba. A keverőtartályba a mintán kívül még pontosan mérlegelt 20 kg csapvizet adagoltunk, amelyet kb. 20 percig a keverővel kevertünk. Ülededés után a kiúszó anyagokat egy hálós kanállal leföloztük.



### 5. Ábra.

*Az élelmiszerhulladék elemzésének folyamatábrája*

A keverés során a keverőlapátokra ráakadt anyagokat is a lefőlözött termékbe tettük (6. ábra). A maradékot egy 10 mm-es lyuknyílású síkszitára öntöttük ki, így keletkezett a „durva” és a „szuszpenzió” termék (7. ábra). Mind a lefőlözött és a durva termékeket mintakisebbitettük, így keletkeztek a részminták a szárítást követő kézi válogatáshoz és a mosószeres mosást követő fizikai elemzésekhez, illetve a biológiai elemzési és lebontási vizsgálatokhoz.



**6. Ábra.**

*A keverőtartályból hálós kanállal lefőlözött kiűszott anyag és a keverőlapátokkal kiemelt anyag*



**7. Ábra.**

*A 10 mm-es lyuknyílású szitán fennmaradt „durva” frakció és a szuszpenzió*

Az elvégzett biológiai vizsgálatokat és a részletes mérési adatokat nem ismertetve a megvizsgált élelmiszerhulladék átlagminta két szemcseméret frakciójának a teljes és csak a szárazanyagra vonatkozó anyagösszetételét a 4. és 5. táblázatok mutatják.

**4. Táblázat.** *A leválogatott élelmiszerhulladék átlagminta teljes (nedves) anyagösszetétele*

	<b>2D műanyag.</b>	<b>3D műanyag.</b>	<b>papír</b>	<b>egyéb</b>	<b>bió</b>	<b>víz</b>	<b>Összesen</b>	
>100 mm	6,11	2,42	2,42	0,65	29,29	59,11	100,0	%
20-100 mm	4,30	0,59	0,47	0,21	37,85	56,57	100,0	%
<b>Összesen</b>	<b>5,4</b>	<b>1,7</b>	<b>1,7</b>	<b>0,5</b>	<b>32,6</b>	<b>58,1</b>	<b>100,0</b>	<b>%</b>

**5. Táblázat.** A leválogatott élelmiszerhulladék átlagminta szárazanyagtartalmának az anyagösszetétele

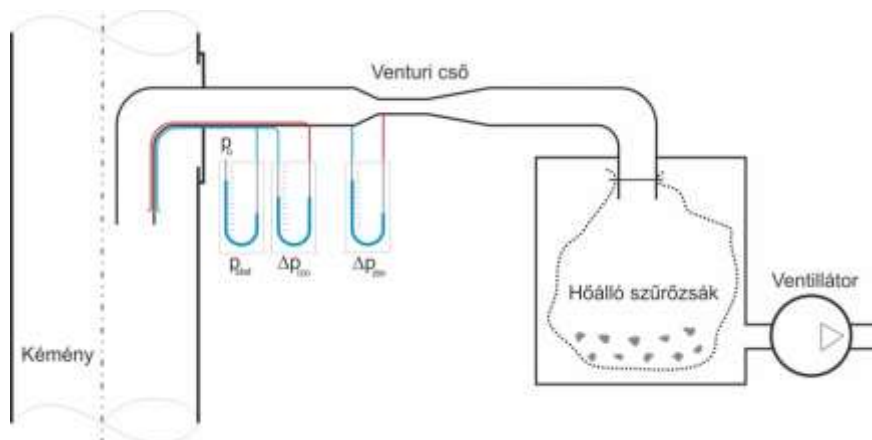
	2D műanyag.	3D műanyag.	papír	egyéb	bió	Összesen	
>100 mm	14,9	5,9	5,9	1,6	71,6	100	%
20-100 mm	9,9	1,4	1,1	0,5	87,1	100	%
Összesen	13,0	4,2	4,1	1,2	<b>77,5</b>	100	%

Megállapítható volt, hogy a vizsgált miskolci mintavételezéskor egy VTSZH átlagminta elemzése során a leválogatott teljes 1.1. Élelmiszerhulladék alkategória szárazanyagtartalmának 77,5 m/m%-a élelmiszer maradvány és 22,5 m/m%-a szennyező (a mérés szempontjából minősül pl. a műanyag szennyezőnek) volt. A szennyező anyagtartalomról 13 m/m% fólia (2D) jellegű műanyag és 4,2 m/m% 3D jellegű műanyag volt. Az aprított mintákon az EPR-es jelleg nem volt megállapítható. A vizsgált élelmiszerhulladék alkategória összetételét a teljes anyagra, azaz az eredeti nedves állapotra is meghatároztuk a mért adatokból (4. Táblázat). Amennyiben a vizet is élelmiszernek tekintjük, akkor a teljes nedves anyagra vonatkozóan a vizsgált minta élelmiszer tartalma 90,7 m/m%, és az ez esetben szennyezőnek minősülő anyag tartalma 9,3 m/m%. A mintavételezés során, a mérési utasítás szerint leválogatott élelmiszerhulladék elvégzett vizsgálatait során készített képeket elnézve (pl. 6. ábra), azt gondolhatnánk, hogy mennyire sok műanyag hulladékot tartalmaz ez az EPR-es alkategória, azonban a mérés konklúziója más. A mért anyagmérték szerint a vizsgált VTSZH átlagmintában a leválogatott teljes 1.1. Élelmiszerhulladék alkategória **szárazanyag-tartalmának** 77,5 m/m%-a volt élelmiszer maradvány és 22,5 m/m%-a szennyező, amelyből 17,2 m/m% a műanyag. Amennyiben a **teljes anyagra**, azaz a mintavételezéskori un. nedves állapotra határozzuk meg az anyagösszetételt, akkor a vizsgált VTSZH átlagmintában a leválogatott teljes 1.1. Élelmiszerhulladék alkategória 90,7 m/m%-a volt élelmiszer maradvány (a vizet is élelmiszernek tekintve) és 9,3 m/m%-a szennyező, amelyből 7,1 m/m% volt a műanyag. Megállapítható, hogy a mintavételezési módszertan alapvetése, - amely szerint egy adott szemcsét a fellelt állapotában szemmel megvizsgálva kell megállapítani, hogy melyik hulladékfajta fordul elő benne legnagyobb tömegben, - az helytálló. A módszertan szerint szennyezőanyagok minősülő anyagok mennyisége a leválogatott élelmiszerhulladékokban nem jelentős. A feltételezések szerint, pl. az élelmiszertől megtisztított csomagolóanyagok tartalmaznak még élelmiszer maradványokat, így nagy mintaelemszám esetében ezek a hatások kiegyenlítődnek. Az elvégzett mérésnek egy másik fontos konklúziója az, hogy az aprítást követő nedvesítés és keverés következtében az élelmiszerek nagy része a 10 mm-től finomabb szemcséket tartalmazó un. szuszpenzióba került, amely pedig megalapozza egy nedves élelmiszerhulladék feldolgozási technológia kifejlesztésének a hasznosságát, bevezetésének a megfontolását.

### 3. ÜZEMKIMÉRÉSEK, SZIMULÁCIÓ

#### 3.1. Szén és biomassza tüzelőanyag-előkészítőkű kimérése, izokinetikus mintavételezés

A korábbiakban már volt szó arról, hogy a nyersanyag-előkészítőkűvek normál üzemeltetése mellett nem keletkezik ahhoz elegendő mért információ, hogy az egyes berendezések tényleges üzemi jellemzőit eljárástechnikai szempontból értékelni lehessen. Továbbá volt már szó a nagytűmőjű csővezetékekben az áramló szilárd-gáz keverék izokinetikus mintavételezéséről is. A Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet 2008-ban teljes üzemkimérést végzett a berentei erőműben Csőke Professzor Úr vezetésével. Ez volt az a munka, ahol elkezdtem megismerkedni ezzel a tématerülettel. Akkoriban az erőmű közel 90%-ban faaprítékot égetett, csak a maradék tüzelőanyag volt szén. A tüzelőanyag előkészítés központi elemei a speciális kialakítású ütőmalmok voltak, amelyek a fa- és szén egyidejű aprítását és a levegő szállítását is végezték. A feladatomban a légtechnikai rendszer felműszerezése, a számítógépes mérésadatgyűjtés kiépítése és a - 3. emeleten lévő 0,8 m belső átműjű tüzelőanyag csővezeték kémlelő nyílását felhasználva – az izokinetikus mintavételezés kialakítása volt. A 7. ábra mutatja a kifejlesztett mintavevő berendezés sematikus ábráját, a 8. ábra pedig a fényképét.



7. Ábra.

*Izokinetikus poremisszió-műő berendezés sematikus rajza*

Az izokinetikus mintavétel azt jelenti, hogy az elszívott rész-gázáram áramlási sebessége a mintavevő szondában megegyezik az azon az áramvonalon lévő eredeti kémény légsebességgel, mert csak ez a konfiguráció biztosítja azt, hogy a vizsgált áramcsőben érkező összes szemcse azonos valószínűséggel kerül a szondába. Amennyiben a mintavevő szonda csővének külső és belső fala mentén a statikus nyomás megegyezik, akkor - a Bernoulli egyenlet értelmében - a mintavétel izokinetikus. Arra kell figyelni, hogy a statikus nyomást érzékelő furatok szájnyílá-

sa az áramvonalakkal párhuzamos legyen, azaz áramvonal ne irányuljon az érzékelő csőbe.



**8. Ábra.**

*Izokinetikus poremisszió-mérő berendezés*

A berendezésre három elektronikus nyomásérzékelő volt felszerelve. Az első a mintavétel pontjában a csővezetékben lévő statikus nyomást mérte. A második a mintavevő szonda belső és külső felületén lévő statikus nyomások közti különbségeket mérte. Amikor ez 0 volt, az jelezte az izokinetikus állapotot. A harmadik pedig a beépített Venturi csőre volt építve, ezzel történt a mintavételi légsebesség mérése, amelyből az idő figyelembe vételével adott elszívott minta légtérfogata számítható volt. A mintába kerülő faapríték leválasztására egy kb. 180 °C-ot eltűrő szűrőzsák került beépítésre. A mintavevő cső, a szerelvények és a szűrőzsák áramlási ellenállásának a pótlására egy frekvenciaváltóról szabályozott tengelyű ventilátor gondoskodott, amelyet úgy kellett becsabályozni, hogy a második nyomásmérő 0-t mutasson.

### **3.2. Mészke előkészítőmű üzemkimérése, gyűrűs malom mátrix modelles szimulációja**

Az üzemkimérésre és egyúttal számítógépes szimulációra szeretnék felidézni egy másik példát, amelynek az apropóját az adja, hogy jelen tanulmánykötetben Csőke Professor Úr a cikkében, - többek közt - a rudasmalmok mátrixmodellre alapuló szimulációs kutatásait foglalja össze. 2011-ben az Omya eger-felnémeti mészke előkészítő üzemében a komplett üzemkimérést már én irányítottam. Az üzemkimérés megtervezése helyszíni szemlével kezdődik, amelynek a legfontosabb célja az az, hogy fel kell deríteni azokat a pontokat, amelyekben mintavétel lehetséges. A Pfeiffer 2800 C típusú gyűrűsmalom (Nagy - Faitli, 2015) egy komplex gép, számos belső anyagárammal, amelyekből nem lehetséges mintavétel (9. ábra). Továb-

bá már az is kihívást jelent, hogy a belső anyagáramok szerinti technológiai folyamatábrát felrajzoljuk.

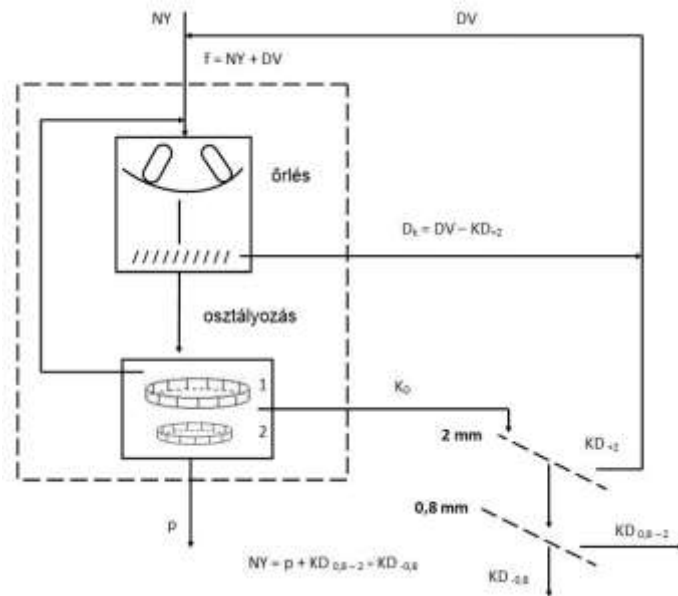


**9. Ábra.**

*A gyűrűs malom szerkezeti felépítése  
(Faitli-Czél, 2013)*

A gyűrűs malom feladását az acél házba épített központi egységbe, konkrétan az őrlőtányérra vezetik. Az álló őrlőgörgők és a forgó őrlőtányér behúzzák a szemcséket a résbe és elkezdődik az anyag aprózódása. Az aprózódott anyagot a centrifugális erő kifelé szállítja, ahol a gyűrű alakú résbe kerülnek. A bevezetett légáram a résen keresztülfolyik és a megfelelő méretű szemcséket felfelé elszállítja. A nagyobb darabok aláhullnak és később újra feladásra kerülnek (**DV** – mint durva vissza). Ezek szerint az őrlés utáni első szétválasztó berendezés maga a gyűrű alakú rés, ami úgy működik, mint egy áramkészülék, amelyben a szemcsék mozgását alapvetően a felfelé mutató légsebesség és a szemcse süllyedési- végsebessége határozza meg.

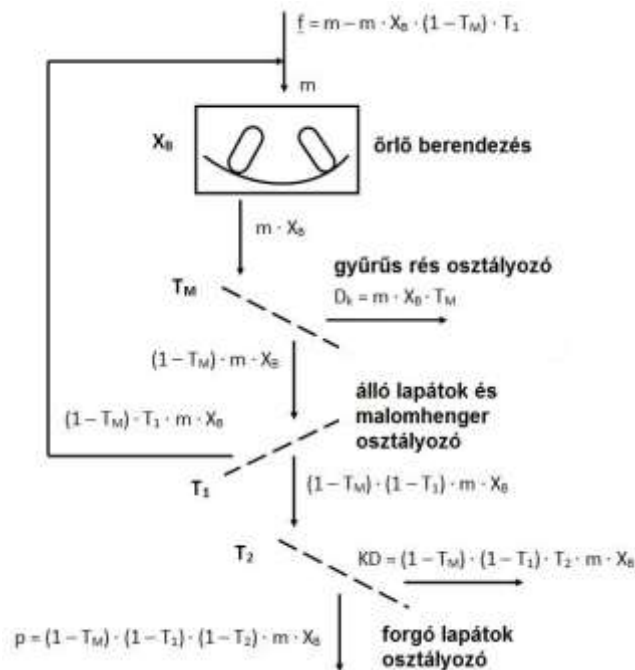
Az első szétválasztó berendezés szétválasztását jellemzi a Tromp függvénye, amit a mátrix modell alkalmazása esetén mátrixként írhatunk fel ( $T_M$ ). A légáram felfelé szállítja az őrlött anyagot a légosztályozóra, elsőként az álló lapátokból álló osztályozó kerékre ( $T_1$ ). Megjegyezzük, hogy maga a malomhenger, mint légáramkészülék is része a  $T_1$  szétválasztó fokozatnak. Ennek a durva terméke visszahullik az őrlőtányérra. Ez azt jelenti, hogy a visszacsatolás a második szétválasztó fokozatról történik, ami a szimulációt meglehetősen megnéhezíti. Az álló lapátokat követik a forgó lapátok, amely a  $T_2$  jelű szétválasztó fokozat. A kettő között az ún. köztes durva frakciót ki- majd a külső támolygó szitára vezetik.



**10. Ábra.**

*A Pfeiffer 2800 C típusú gyűrűsmalom és kiegészítő sziták modellje  
(Nagy – Faitli, 2015)*

Ezek szerint a Pfeiffer gyűrűsmalom belső technológiai folyamata egy aprító ( $\mathbf{X}_B$ ) és három szétválasztó ( $\mathbf{T}_M$ ,  $\mathbf{T}_1$ ,  $\mathbf{T}_2$ ) fokozatból áll. A 11. ábra pedig ennek a négy eljárásból álló technológiának a felírt mátrix modellezését mutatja, amelyben az  $\mathbf{m} \cdot \mathbf{X}_B$  azaz a gyűrűs őrlés töretének a szemcseméret-eloszlása a könyvben korábban Csőke által kifejtett és itt módosított mátrix modellel számítható.



11. Ábra.

A Pfeiffer 2800 C gyűrűsmalom mátrix modellje

Ezek az egyenletek a központi technológia mindhárom kimenetére megoldhatók, azaz az anyagáramok jellemzői számíthatók, amennyiben az aprítási és a szétválasztási mátrixok ismertek.

$$D_k = T_M [I - X_B (I - T_M) T_1]^{-1} X_B f \quad 1)$$

$$K_D = (I - T_M) (I - T_1) T_2 [I - X_B (I - T_M) T_1]^{-1} X_B f \quad 2)$$

$$p = (I - T_M) (I - T_1) (I - T_2) [I - X_B (I - T_M) T_1]^{-1} X_B f \quad 3)$$

A forgó lapátok ( $T_2$ ), mint osztályozó berendezésnek mind a finom és a durva terméke kivezetésre kerül a malomból, így azok mintavételezhetőek voltak. A jól ismert Rosin-Rammler függvény jól illeszkedett a mért adatokra, így a  $T_2$  szétválasztási mátrixot meghatároztuk. A gyűrűs réses osztályozó ( $T_M$ ) és az álló lapátok és malomhenger osztályozó ( $T_1$ ) szétválasztási mátrixát szintén a Rosin-Rammler függvény segítségével modelleztük. Mivel a malmon áthaladó légáramot mértük, így a gyűrűs résekben és a malomtestben is ki tudtuk számítani az átlagos légsebességet, majd pedig azt a méző szemcseméretet, amelynek pontosan ekkora a súlylédési vége sebessége. Ezzel modelleztük az elválasztási szemcseméreteket, a szétválasztás élességét, azaz a kitevőt, pedig a teljes technológiára vonatkozó iterációval becsültük. Az 1, 2 és 3 egyenlet szerinti mátrixmodell számításokat Czél Péterrel együtt végeztük el (Faitli-Czél, 2014), amelyhez egy excel szimulációs file-t

fejlesztettünk. A Csőke által a jelen könyvben leírt rudasmalmokra vonatkozó, - ismételt törési lépcsőkből - álló mátrix modellt a következők szerint módosítottuk. Számos őrlési alapvizsgálatot végeztünk Hardgrove malomban mészkő mintákkal. A mérési eredmények megerősítették, hogy a Broadbent - Calcott függvény (Csőke, 2026) jól alkalmazható erre az anyagra, így abból számítottuk a  $\mathbf{B}$  törési mátrixot. A gyűrűs őrlés során a részben fellépő osztályozódást nagyrészt a Csőke által leírt módszer szerint vettük figyelembe, azonban a számítást módosítottuk. A körfolyamatos szimuláció miatt olyan  $\mathbf{X}_B$  aprítási mátrixra van szükség, amelyből egy szorzással töretet lehet számítani, ezért felírtuk a 4. egyenletet:

$$X_j = B \cdot S + I - S \quad X_B = \begin{bmatrix} j = v \\ \pi \\ j = 0 \end{bmatrix} X_j \quad p = X_B \cdot f \quad 4)$$

Ebben az esetben a görgők és a tányér közötti részben megvalósuló ismételt aprózó-dási lépcsőket egy eredő  $\mathbf{X}_B$  aprítási mátrix kiszámításával jellemeztük. Ez a megadott módszer szerint külön elvégezhető, amikor az  $X_j$  őrlési lépcsőt jellemző aprítási mátrix  $j$  és  $j+1$  mátrixait szorozzuk össze lépésenként. A  $j+1$  lépcső mátrixát a Csőke által leírtakhoz hasonló módon, azaz az oszlopok jobbra és a sorok lefelé való eltolásával és a felszabaduló helyekre 0 beírásával kaphatjuk meg, amely így modellezi az osztályozódást, azaz azt, hogy az adott résnél nagyobb szemcsék nem juthatnak át az adott résen. Az  $\mathbf{S}$  törési valószínűség mátrix és a  $v$  ismételt törési lépcsők száma értékeit az excel-ben megírt szimulációs program segítségével az üzemi mérések adataira történő iterációval (megismételt számításokkal) határoztuk meg.

### 3.3. Néhány gondolat üzemkimérés megtervezéséhez

A 2. ábrán egy beton-tégla-malter anyagokat tartalmazó építési és bontási hulladék feldolgozására alkalmas technológia folyamatábrája látható. Tétélezzük fel, hogy ez az üzem már üzemel a gyakorlatban. Az üzemkimérés célja az, hogy a technológia minden elemének (berendezés – eljárás) a működése eljárás-technikai szempontból értékelhető legyen, azaz a jellemző függvényeik a mérési eredményekből meghatározhatók legyenek. Az elv az az, hogy pontosan az elegendő mennyiségű mérést kell elvégezni, kevesebb mérés nem kiértékelhető, több mérés pedig túlhározott. A 2. ábrán négyzettel bekarikázva azok az anyagáramok láthatók, amelyek esetében tömegáramot kell mérni, karikával bekarikázva pedig azok az anyagáramok, amelyek esetében a minőségi jellemzőket mintavételezéssel kell meghatározni, tehát valójában egy megtervezett üzemkimérés látható az ábrán. Ez egy egyszerűbb technológia csak aprítási és kéttermékes szétválasztási eljárásokat tartalmaz. Vizsgáljuk meg, hogy ezek esetében külön-külön melyik anyagáramok tömegáramát és minőségét kell mérni (12. ábra).



12. Ábra.

Egy aprítási és egy kéttermékes szétválasztási eljárás mintavételezése

Egy normál aprítási eljárásban (nincs tömítetlenség) a töret tömegárama megegyezik a feladáséval, ezért csak az egyiket kell mérni. Mivel a töret szemcseméret-eloszlása finomabb, általában ott könnyebb tömegáramot mérni. Ahhoz, hogy az eredő törési mátrixot ( $\mathbf{X}_B$ ) ki tudjuk számítani, ezért mind a feladás ( $f$ ) és a töret ( $a$ ) szemcseméret - hisztogramot mintavételezéssel meg kell határozni. A kéttermékes szétválasztás esetében a Tromp függvényt kétféleképp lehet megmérni. Amennyiben a tömegkihozatal nem mérhető, mindhárom anyagáram összetételét mintavételezéssel kell meghatározni és a kiértékelést az un. legvalószínűbb tömegkihozatal meghatározásával kell elvégezni. A másik esetben a három anyagáram közül tetszőleges kettő esetén kell mind tömegáramot és minőséget mérni. A 12. ábrán az az eset látható, amikor a két terméket választjuk ki, ilyenkor elsőként a feladás szemcsejellemző-hisztogramot ( $f$ ) kell a termékek összegzésével meghatározni. A Tromp függvény jól ismert képletéből látszik, hogy az A termék tömegkihozatalából és a feladás ( $f$ ) és az A termék ( $a$ ) szemcsejellemző-hisztogramok ismeretében lehet azt meghatározni.

Ha most ezek után ránézünk a 2. ábrára, azt látjuk, hogy a technológia 4 eljárásból, - mivel a T1 és T2 szitasíkok egy szitaberendezésbe vannak építve, ezért - 3 berendezésből és 9 anyagáramból áll. Az ábrán látható, hogy az F és R anyagáramok külön nyílal és betűjellel szerepelnek, holott ez ugyanaz a szállítószalag csak a V anyagáram is rá van vezetve. Gyakori, hogy ide csak egy nyilat rajzolnak, azonban véleményem szerint, ha nem tekintjük ezeket külön anyagáramoknak a mérlegegyenletek nem írhatók fel logikusan. A megtervezett üzemkimérés szerint 4 anyagáram esetében kell tömegáramot mérni és 5 anyagáram esetében kell minőséget mérni mintavételezéssel. Ebben a gyakorlati esetben ez a pont kielégítő mennyiségű mérés, ebből minden anyagáram és eljárás eljárástechnikai jellemzői meghatározhatók. Természetesen bármelyik anyagáram kiválasztható tömegáram és minőség mérésére, azonban mindig ennyi lesz a pontosan elegendő mennyiség erre a technológiára. Ennek az ellenőrzését egyszerűen elvégezhetjük, ha végigvizsgáljuk azt, hogy a mérlegegyenletek segítségével melyik ismeretlen mennyiséget lehet a mért mennyiségekből meghatározni.

**HIVATKOZÁSOK**

- [1.] Csöke B., Faitli J., Nagy S., Rác Á., Fehérné Szirmai Zs.: A hulladék-előkészítés fizikai-mechanikai eljárástechnikai alapjai. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, 309 p., ISBN: 9786155626852, (2024)
- [2.] Faitli J., Czél P.: Matrix Model Simulation of a Vertical Roller Mill with High-Efficiency Slat Classifier. *CHEMICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY* (0930-7516 1521-4125): 37 5 pp 779-786 (2014) DOI: 10.1002/ceat.201300665
- [3.] Faitli J., Romenda R., Nagy S.: Települési szilárd hulladékok vizsgálata és elemzési módszertanának fejlesztése. In: Faitli J. (szerk.) 100 éves a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet: Szemelvények az intézet szakmai-tudományos eredményeiből. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, pp 213-232, ISBN: 9786155626883, (2023)
- [4.] Faitli J., Leitöl Cs., Ágoston Cs.: The evolution of the Hungarian MSW sampling methodology from Pierre Gy's MODECOM to sophisticated EPR and DRS based one. In: Cossu R. (szerk.) Proceedings of the VENICE2024 10th International Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venice, Olaszország 11.27. - 11.29. (2024)
- [5.] Nagy L., Faitli J.: Gyűrűs malmok üzemének optimalálása az energiamérleg- és a mátrix modell segítségével. *BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK-BÁNYÁSZAT* (0522-3512 ): 148 6 pp. 16-21. (2015)
- [6.] Nagy Z., ifj. Nagy Z., Csöke B., Faitli J.: Kompakt szeparátor fejlesztése szilárd hulladékok feldolgozására. In: Faitli J. (szerk.) 100 éves a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet: Szemelvények az intézet szakmai-tudományos eredményeiből. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó, pp 50-64, ISBN: 9786155626883 (2023)

## **APRÍTÁSI ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSE A HULLADÉKAPRÍTÁSTÓL A SZEMCSEALAK-MÓDOSÍTÁSIG**

**RÁCZ ÁDÁM**

*Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyagelőkészítés és Környezettudományi Intézet  
adam.racz@uni-miskolc.hu  
ORCID: 0000-0002-6561-2177*

**Absztrakt:** A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítés és Környezettudományi Intézetében a kezdetek óta folynak az aprítási eljárások fejlesztése, melyből Csőke Barnabás több mint öt évtizede veszi ki a részét. De nem csak az aprítás fejlesztésébe, hanem annak oktatásába is igen jelentős energiákat fektetett pályája során, aminek a nyomás számos Phd fokozattal rendelkező kutatót nevelt ki. Egyik tanítványaként ebben a tanulmányban két olyan területet szeretnék bemutatni, aminek az elindítása az Ő nevéhez fűződik, de mára önállóan fejlesztjük a területeket a tőle tanultak felhasználásával.

**Kulcsszavak:** *aprítás, szemcsealak-formálás, nem-rideg anyagok*

### **1. BEVEZETÉS**

A két tématerület egymástól meglehetősen távol áll az aprítás tématerületén belül. Az egyik a szemcsealak-módosítás, míg a másik a nem rideg anyagok, hulladékok aprítása. A szemcsealak-módosítás kutatásának kezdete a száraz keverőmalmi őrléshez kötődik, mely területen 2008-ban kezdtem meg kutatásaimat Csőke Profesz-szor Úr javaslatára. Szakaszos üzemű őrlési kísérleteim során mindig azzal szembesültem, hogy az anyag nagyon hamar betapad az őrlőtérbe a nagyon intenzív szemcseméret-csökkenés miatt, ezért ennek a problémának az orvoslását azzal próbáltam megoldani, hogy növeltem a feladási szemcseméretet, ami által az anyag jelentős betapadás nélküli őrlési ideje megnőtt, így az őrlés során lejátszódó folyamatok vizsgálhatóvá váltak az idő függvényében. Ugyanakkor a feladási szemcseméret emelése egy ponton eljutott addig, hogy az őrlőtesteknek a teljes szemcsetöréshez már nem rendelkeztek kellő mozgási energiával, így csak a szemcsék felületi törése és koptatása valósult meg. Mindez a szemcseméret-eloszlás eredményeken váltak láthatóvá, hiszen az  $x_{50}$ ,  $x_{80}$  nem változott jelentősen az őrlés során, de a finom tartományban megfigyelhető volt szemcsék képződése. Aztán egy gondolat-tól vezérelve a szemcséket megnéztem mikroszkóp alatt, amikor is jött a felismerés, hogy habár a szemcseméret nem csökkent jelentősen, de gömbszerű, sima felületű szemcsék keletkeztek. Ezt a felismerést aztán egy részletes kutatási program követte, aminek néhány elemét foglalom össze ebben a cikkben.

A nem rideg anyagok, hulladékok aprítása némileg más terület, hiszen itt Csőke Professzor Úr alapozta meg a hazai szakirodalmat és a hazai gépgyártást is. Talán itt tartott a legtovább megérteni mondandójának minden részletét, kellett hozzá több mint 10 év. Aztán jött egy olyan projekt, ahol a gyakorlatba is átültethettük azt, amit tőle tanultunk és új tudásra is szert tehettünk. Egy axiál réses nyíró-aprítógépet építettünk az Intézeti műhelyben, amely a csomagolt élelmiszer hulladék aprítására fejlesztettünk ki.

## 2. SZEMCSEALAK-MÓDOSÍTÁS

A szemcsealak a szemcsés anyagalmazokkal dolgozó folyamatok számos aspektusában fontos szerepet játszik. Az alak befolyásolja, hogy a szemcsék hogyan égnak, tömörödnek, hogyan nyerhetők vissza, miként szállítódnak folyadékokban, hogyan szinterelődnek, hogyan vágnak, koptatnak, oldódnak folyadéokban, reagálnak vegyi anyagokkal, hogyan alkotnak szerkezeti anyagokat, miként tartanak vissza folyadékokat, illetve hogyan teszik lehetővé a folyadékok átáramlását [1]. Az ásvány- és hulladékfeldolgozásban a szemcsealak hatással van a szeparáció hatékonyságára, ezért fontos szerepet játszik ezekben a technológiákban. A szemcsealak például befolyásolja számos ásvány flotálhatóságát: általában a szabálytalan, megnyúlt és lapított szemcsék jobban visszanyerhetők a flotáció során, mint a kerek szemcsék és gömbök a legtöbb ásványtípus esetében [2]. A szemcsealak hatással van a szemcsék szilárdságára is, így például az útépités területén kerülni kell a szemcsék lemezes jellegét, és a kubikus szemcsealak az előnyös. A hulladékfeldolgozásban az örvényáramú szeparálás a vezető termék alkotórész tartalma és kihozatala függ a szemcsealaktól [3]. Ebből a szempontból a gömb- vagy hengeres szemcsealak az előnyösebb. A szemcsealak minden olyan szeparációs módszert is befolyásol (például légáramú osztályozást), ahol az ülepedési sebesség szerepet játszik. A szemcsealak-alapú szeparációs technikákat széles körben alkalmazzák ömlesztett anyagoknál [4], valamint a hulladékfeldolgozásban is. A műanyagok szelektív elválasztását flotációval szintén befolyásolja a szemcsealak; ebben az esetben a kerekesebb forma lehet az előnyösebb [5].

A szükséges szemcsealakot és felületi érdességet a termék alkalmazási területe vagy az aprítást követő további feldolgozási lépés határozza meg. Az ásvány- és hulladékélelmiszerfeldolgozásban az aprítás során a szemcsealak módosítása többféleképpen történhet:

1. A szemcsealak az anyag deformációjának eredménye.
2. A szemcsealak a törési folyamat eredménye. Ebben az esetben két alcsoport különböztethető meg: a folyamat során a szemcseméret is jelentősen csökken; illetve amikor nincs jelentős szemcseméret-csökkenés a szemcsealak-módosítás során.

### ***2.1. A szemcsealak az anyag deformációja révén jön létre, a méretcsökkentési folyamattal párhuzamosan, komplex igénybevételek hatására***

Ez az eset elsősorban a fémek aprításánál fordul elő, amelyet jellemzően nagy sebességű shredderekben végeznek. A lengőkalapácsos shredderekben a szemcséket nyíró-, húzó-, ütő-, hajlító- és csavaró igénybevételek érik. A kalapácsok 40–60 m/s sebessége mellett rendkívül összetett terhelési állapot alakul ki, amely nagyfokú feltárást eredményez a hulladékszemcséket felépítő szerkezeti anyagok esetében [9]. Ezek közül az összetett igénybevételek közül a hajlító- és ütő, ütköző igénybevételek játszanak kiemelkedő szerepet. A rotoros aprítógépekben végbemenő aprítási folyamatokat több szerző is leírta [6, 10–13]. A fém szemcsék aprítás utáni alakját Sander és munkatársai részletesen vizsgálták [11]. A fém szemcsék szemcsealak-módosulását alapvetően az igénybevételi környezet és az anyag deformációja határozza meg. A szemcsealak módosulását ugyanakkor nem csak shredderekben, hanem nyíró-aprítógépekben is megfigyelhetjük. Rácz és Tamás [16] blokk késes, radiál réses nyíró-aprítógépben kimutatta, hogy az alumínium aprítása során kialakuló szemcsealakot nagymértékben befolyásolja a szemcséket érő igénybevétel jellege. A szemcsék gömbösségét jelentős mértékben befolyásolja a radiális résű forgó nyíróban eltöltött tartózkodási idő is: a nagyobb aprítási fok következtében gömbölyűbb szemcsealak alakul ki. Gömbszerű szemcsealak eléréséhez a hajlító- és ütő igénybevételek kedvezőek, míg lemezes szemcsealak kialakulásához a nyíró igénybevételek megfelelőek. A kialakuló szemcsealak tehát az aprítási folyamat során jön létre, és az eredeti mérethez képest jelentős szemcseméret-csökkenés is bekövetkezik az alakváltozás és a deformáció hatására. Ebben az esetben maga az aprítási folyamat határozza meg a szemcsealakot, az igénybevétel típusán és az igénybevételi környezeten keresztül.

### ***2.2. Szemcsealak-módosítás felületi törés és koptatás révén, jelentős szemcseméret-csökkenés nélkül***

Keverőmalmi őrléssel sima felületű, közel gömb alakú szemcsék állíthatók elő jelentős szemcseméret-csökkenés nélkül a <200 µm-es szemcseméret tartományban. A folyamat bármely őrlőtestes malomtípusra alkalmazható a feladási szemcseméret és az őrlőtestes méret és sűrűség helyes megválasztásával. A szemcsealak módosítását száraz keverőmalmi őrlés során Rácz írta le [7]. Amennyiben az őrlőtestek által létrehozott igénybevételi energia kisebb, mint a teljes szemcsetöréshez szükséges energia, akkor kizárólag felületi koptatás és felületi törés megy végbe. Ez a folyamat a szemcsék lekerekedéséhez, valamint sima felületű, gömbszerű szemcsealak kialakulásához vezet [7,8]. Rácz [7, 16] először statikus képelemzésen alapuló vizsgálati és értékelési modellt dolgozott ki a keverőmalmi szemcsealak módosítás leírására és a folyamat optimalizálására, majd később a módszert átültette dinamikus képelemzéssel történő vizsgálatra is. Bevezette a szemcsealak módosítás hatásfoka és teljesítménye fogalmakat [16].

### 2.3. A szemcsealak a törési folyamat eredménye, miközben a szemcseméret is csökken

Ebben az esetben a kialakuló szemcsealak az aprítási, törési folyamat során, annak eredményeképpen jön létre, és az eredeti mérethez képest jelentős szemcseméret-csökkenés is bekövetkezik. Itt tehát maga az aprítási folyamat, az igénybevétel típusa és az igénybevételi környezet határozza meg a szemcsealakat. Az igénybevétel típusa és az igénybevételi környezet szemcsealakra gyakorolt hatását az ásványelőkészítés területén, rideg anyagokra számos kutató vizsgálta, és jelentős mennyiségű általános ismeret áll rendelkezésre. Ilyen például az a megállapítás, hogy az egyedi szemcse nyomás igénybevételével való aprítása lemezes szemcsealakat eredményez, míg az ütközése igénybevétel kubikus szemcsealak kialakulásához vezet. A közet töretek lemezességének számának változását a nyomással való aprítást követően Bengtsson és munkatársai vizsgálták különböző körülmények között [14]. Arra a következtetésre jutottak, hogy a szemcse réteg nyomás és nagy tömörítési aránnyal kombinálva kedvező hatású a szemcsealak szempontjából [14]. Tamás és Rác [15] rámutattak arra, hogy korund esetében a szemcseágyas nyomás – az egyedi szemcse nyomás igénybevételével ellentétben – nem lemezes szemcsealak kialakulásához vezet. Rác és Tamás [16] a bálázott szalmát és kukoricaszárat először axiális résű forgó nyíróaprítógépben, lengőkalapácsos shredderben, majd vágómalomban és kalapácsos törőkben aprították. Mindkét anyag esetében – héjas és rostos szerkezetük miatt – az aprítás során túszerű és lemezes szemcsealak alakul ki. Az aprítási eljárás megválasztásakor a cél az volt, hogy a szemcsék megnyúltságát csökkentsék a 0,5-2 mm-es szemcseméret-tartományban. Megállapították, hogy a vágás és nyírás igénybevétele vágómalomban és axiális réses nyíróaprítógépben kevésbé hosszúka szemcsealakra vezetett mindkét anyag esetén, mint a komplex (ütés, ütközés, hajlítás, nyírás) igénybevételekkel működő kalapácsos törő és shredder.

Összefoglalásként megállapítható, hogy az alkalmazott igénybevétel típusa, az igénybevételi környezet és a törési mód az alapanyag tulajdonságaival együtt határozza meg az aprítás során keletkező szemcsealakat. A megfelelő igénybevételi típus és törési mód megválasztásával a termék szemcsealakja bizonyos határok között szabályozható.

### 3. AXIÁL RÉSES NYÍRÓ-APRÍTÓGÉP FEJLESZTÉSE CSOMAGOLT ÉLELMISZER HULLADÉK APRÍTÁSÁRA

Az Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézetben egy mobil aprítógép fejlesztése volt a feladatunk a „2024/25-ös országos települési szilárdhulladék vizsgálati kampányok elvégzése” című projekt keretében, ahol a cél az volt, hogy kísérleti berendezéseket és módszertant fejlesszünk a TSH összetétel vizsgálata során kiválogatott élelmiszer alkategória csomagolóanyag tartalmának meghatározására. A megfelelő aprítóberendezés típus kiválasztásának érdekében aprítási előkísérleteket végeztünk csomagolt élelmiszerekkel és zöldséggel. Az előkísérletek során axiál réses nyíróaprítógépben, kalapácsos törőben, radiál réses nyíróaprítógépben és vágómalomban próbáltuk ki a csomagolt zsemle, csomagolt felvágott és a saláta aprítását. Az itt szerzett tapasztalatok és a szükséges gépméret, tisztíthatóság figyelembevétel után végül az axiál réses nyíróaprítógépet választottuk ki a feladat megoldására. A berendezés eljárás technikai méretezését Csöke és szerzőtársai [17] módszertana alapján Rácz Ádám végezte, a gépészeti tervezést Rácz Ádám és Kövesi Viktor végezte.



**1. Ábra.**

*Az elkészült axiál réses nyíróaprítógép (fő egységek: a) villamos kapcsolódoboz, b) feladógarat, c) nyírotér, d) termék gyűjtő edényzet, e) hajtómotor, f) állványzat)*

A berendezés szélességét 0,25 m-re vettük fel, ismerve a feladásra kerülő legnagyobb méretű darabokat, amiben a folyadékkal töltött üdítős palackokat vettük kiindulási pontnak. A tárcsák átmérőjét a nagy feladási szemcseméret miatt 0,2 m-

re választottuk meg. A rotor kerületi sebességet 0,5 m/s-ra állítottuk. A nyomaték és teljesítményszükséglet meghatározásához egy szélsőséges esetet vettünk alapul, amikor 1,5 mm vastag fémlemezt kell elnyírnia a berendezésnek. Ezzel szándékosan az volt a célunk, hogy a berendezést túlméretezzük, mivel a válogatott élelmiszer hulladékban szinte bármi előfordulhat, akár csontok, konzerves élelmiszerek is. A lassító hajtóművön ébredő veszteség miatt végül 2x4 kW hajtóműves motort választottunk ki a berendezés üzemeltetéséhez. A nyírotárcsákat és távtartókat síkköszörültettük, aminek a segítségével 0,08 mm-es nyírórést állítottunk be a berendezésben azért, hogy a műanyag fóliát is hatékonyan aprítsa a gép. Az elkészült berendezést a fő egységek bemutatásával a 1. ábra mutatja. A berendezést a könnyű tisztíthatóság miatt részben forgatható fésűsorrall láttuk el, aminek az eredményeképpen a tárcsák közé betapadt, a gépben maradt mintaanyag könnyen eltávolítható. A berendezés elkészítésével bizonyítottuk, hogy a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet nem csak az eljárás technikai méretezést, hanem kisebb gépek esetén a gépészeti tervezést és a házon belüli gyártást is képes elvégezni.

#### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az axiál réses nyíró-aprítógép fejlesztése a „2024/25-ös országos települési szilárdhulladék vizsgálati kampányok elvégzése” című, „KGVHF/239/2024-EM\_SZERZ” jelű projekt keretében valósult meg az Energiaügyi Minisztérium támogatásával.

#### HIVATKOZÁSOK

- [1] T. E. Durney, T. P. Meloy, *Int. J. Miner. Process.* 1986, 16 (1–2), 109–123. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(86\)90078-5](https://doi.org/10.1016/0301-7516(86)90078-5).
- [2] W. Xia, *Powder Technol.* 2017, 317, 104–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.04.050>.
- [3] Y. R. Smith, J. R. Nagel, R. K. Rajamani, *Miner. Eng.* 2019, 133 (December 2018), 149–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.025>.
- [4] M. Furuuchi, K. Gotoh, *Powder Technol.* 1992, 73 (1), 1–9. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)87001-Q](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)87001-Q).
- [5] F. Pita, A. Castilho, *Waste Manag.* 2016, 48, 89–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.034>.
- [6] D. Woldt, G. Schubert, H. G. Jäckel, *Int. J. Miner. Process.* 2004, 74 (SUPPL.), 405–415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.07.008>.
- [7] Á. RÁCZ, *Chem. Eng. Technol.* 2014, 37 (5), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201300671>.

- [8] Á. Rácz, B. Csőke, *Int. J. Miner. Process.* 2016, 157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.09.005>.
- [9] G. Csőke, B., Schubert, *Bányászati és Kohászati Lapok - Bányászat.* 2013, 1.
- [10] P. Russo, L. Aboussouan, J. P. Birat, S. Sander, H. G. Jäckel, G. Schubert, *Int. J. Miner. Process.* 2004, 74 (SUPPL.), 395–403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.07.040>.
- [11] S. Sander, G. Schubert, G. Timmel, *Powder Technol.* 2002, 122 (2–3), 177–187. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00414-4](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00414-4).
- [12] S. Sander, G. Schubert, H. G. Jäckel, *Int. J. Miner. Process.* 2004, 74 (SUPPL.), 385–393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.07.038>.
- [13] G. Timmel, S. Sander, G. Schubert, in *Proc. XXI Int. Miner. Process. Congr.* 2000.
- [14] M. Bengtsson, E. Lee, C. M. Evertsson, *Miner. Eng.* 2010, 23 (7), 549–557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.009>.
- [15] L. Tamás, Á. Rácz, *Open Ceram.* 2023, 16 (August). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100489>.
- [16] A. Rácz, L. Tamás *Chem. Eng. Technol.* 2025, 48 (10). DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.70114>.
- [17] Csőke, B. – Papp, G. – Sárvári, J. – Antal, G. – Nyitrai, S.: *Entwicklung einer Rotorscherenfamilie in der Jászberényer Zerkleinerungsmaschinenfabrik AG. Freiburger Forschungshefte*, 1997. A 840. p. 111-121.

## CEMENTHELYETTESÍTŐ ÉS GEOPOLIMER ALAPANYAGOK ELŐÁLLÍTÁSA MECHANIKAI AKTIVÁLÁSSAL - SZEMELVÉNYEK CSŐKE BARNABÁS ÉS MUNKATÁRSAI KUTATÁSI EREDMÉNYEIBŐL

SZABÓ ROLAND<sup>1\*</sup>, CSŐKE BARNABÁS<sup>2</sup>, MUCSI GÁBOR<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet

<sup>1\*</sup>roland.szabo@uni-miskolc.hu, <sup>2</sup>barnabas.csoke@uni-miskolc.hu, <sup>3</sup>gabor.mucsi@uni-miskolc.hu

<sup>1</sup>ORCID: 0000-0002-4536-7610

<sup>3</sup>ORCID: 0000-0003-1031-2801

**Absztrakt:** A portlandcement gyártása jelentős CO<sub>2</sub>-kibocsátással jár, ezért kulcsfontosságú olyan megoldások alkalmazása, amelyek a cementklinker arányának csökkentésére és/vagy alternatív kötőanyagok fejlesztésére irányulnak. E kihívásokra reagálva a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézete (NyKI) már több mint két évtizede folytat intenzív kutatásokat, melyek célja különböző ipari melléktermékek (pl. erőműi pernye) és egyéb aluminoszilikát tartalmú anyagok (pl. pumicit, kaolin, cementkőpor) reaktivitásának növelése mechanikai aktiválással. Ezáltal közvetlenül hasznosíthatók cementhelyettesítő és cementkiegészítő anyagként (angolul supplementary cementitious material, (SCM)), vagy geopolimer rendszerek alapanyagaként, ezzel is hozzájárulva a fenntartható építőipari megoldásokhoz. Jelen tanulmány Csőke Barnabás professzor és kutatócsoportjának több évtizedes munkáját kívánja összefoglalni az ipari melléktermékek és egyéb ásványi anyagok mechanikai aktiválása terén végzett kutatásokon keresztül.

**Kulcsszavak:** Ipari hulladékok, mechanikai aktiválás, cementhelyettesítő anyagok, geopolimer

### 1. BEVEZETÉS ÉS SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A cementipar a globális CO<sub>2</sub>-kibocsátás mintegy 7-8%-áért felelős (Wu S. és munkatársai 2024). A klinker előállításának termokémiai folyamatai (mint pl. a mészkő dekarbonizációja), illetve a kemencefűtés nagy CO<sub>2</sub> emisszióval járnak, mely folyamatok a cementgyártáshoz köthető CO<sub>2</sub>-kibocsátás mintegy 85%-át teszik ki (Lippiatt N. és munkatársai 2020). Ezért stratégiai cél a klinker részarányának csökkentése és/vagy új, cementmentes kötőanyagok (pl. alkáli-aktivált rendszerek, geopolimerek) kifejlesztése. Manapság a cementhelyettesítő anyagokat széles körben alkalmazzák, melyek életképes megoldást jelentenek a portlandcement részleges helyettesítésére, hozzájárulva egyrészt a CO<sub>2</sub>-kibocsátás csökkentéséhez, másfelől az ipari melléktermékek hasznosításának eszköze is. Ezen aluminoszilikát-tartalmú ipari melléktermékek, mint pl. az erőműi pernye, kohászati salak, nagy mennyiségben állnak rendelkezésre és puccolános tulajdonságokkal bírnak. Tulaj-

donságaikat ugyanakkor számos paraméter befolyásolja, pl. az erőműi pernye fizikai tulajdonságai, kémiai és ásványi összetétele nagymértékben függ az elégetett szén ásványi összetételétől és az égetési technológiától, ami jelentősen befolyásolja a gyakorlati alkalmazhatóságukat is (Csőke B. és munkatársai 2007a; Mucsi G. és Csőke B. 2014). A deponált ipari melléktermékek (köztük az erőműi pernye) felhasználásának legnagyobb korlátozó tényezői azonban a nyersanyag heterogenitása és alacsony reakcióképessége. Megfelelő nyersanyagelőkészítéssel ugyanakkor biztosítható, hogy az ipari melléktermékek rendelkezzenek a cementtartalmú vagy cementmentes (alkáli aktivált) kötőanyagok előállításához szükséges fizikai és kémiai tulajdonságokkal. Erre alkalmas előkészítési folyamatok közé sorolhatók olyan eljárás-technikai módszerek, mint a szárítás, homogenizálás, osztályozás, melyekkel az anyag minőségének javítása érhető el (Mucsi G. és munkatársai 2011a; Kumar S. és munkatársai 2015; Szabó R. és munkatársai 2020; Szabó R. és munkatársai 2025), míg az őrlés (mechanikai aktiválás) az alacsony reakcióképesség fokozására alkalmazható (Kumar S. és Kumar R. 2011; Mucsi G. és munkatársai 2015; Mucsi G. 2016).

Smekal (1952) szerint a mechanikai aktiválás olyan mechanikai energia-bevitel, amely a kémiai összetétel megváltoztatása nélkül növeli a rendszer reakciókészségét. A mechanikai aktiválásnak számos formája létezik, melyet Juhász és Opoczky (1990) írt le. Megkülönböztethető:

- (i) mechanikai diszpergálás (szemcseméret-csökkentés), ahol a megnövekedett reaktivitás a nagyobb fajlagos felület eredménye,
- (ii) felületi aktiválás (felületi hibák, energiaállapot), ahol a fajlagos felület mellett a fajlagos felületi szabadenergia is megváltozik, vagyis a mechano-kémiai reakciók a szemcse felületén játszódnak le, és
- (iii) mechano-kémiai/szerkezeti aktiválás (rácshibák, amorfizálódás), amikor is a fajlagos felület és a fajlagos felületi szabadenergia növekedése mellett csökken a kristály rácsenergiája is (kristályrácsstorzulás következik be, vagy az anyag amorffá válik), vagyis a szemcse belsejében szerkezeti átrendeződések zajlanak le.

A hagyományos golyósmalmok, valamint a nagy energiasűrűségű bolygó-, vibrációs- és keverőmalmok ezek kombinációját valósítják meg, ezáltal a mechanikai aktiválás elsődleges eszközeinek tekinthetők (Mucsi G. és munkatársai 2015; Mucsi G. 2019).

A cementhelyettesítő anyagok mellett az utóbbi évtizedekben széles körben kezdtek kutatni az ipari melléktermékek alkáli aktivált rendszerek alapanyagaként való felhasználási lehetőségét. Az alkáli aktivált anyagok (szűkebb értelemben geopolimerek) előállítása szilárd aluminoszilikátok lúgos (ritkábban savas) közegben történő oldásán alapul. Az így keletkezett anyagok mesterséges kőzeteknek is tekinthetők (Davidovits J. 2011). A primer nyersanyagok (pl. kaolin, perlit,

pumicit) mellett széles körben alkalmazhatók különféle ipari melléktermékek (pl. erőműi pernye, kohászati salak, vörösiszap) és építési-bontási hulladékok is egyaránt. A kombinált hulladékhasznosítás és változatos adalékanyagok alkalmazása révén olyan geopolimer rendszerek fejleszthetők, amelyek innovatív és környezetbarát alternatívát jelentenek a hagyományos cementalapú termékek részleges vagy teljes kiváltására, hozzájárulva a fenntartható építőipari megoldásokhoz (Provis J. és van Deventer J.S.J. 2009). Ugyanakkor, a nyersanyagelőkészítés a geopolimerek előállításában is kiemelt jelentőséggel bír, mivel a megfelelően előkészített hulladékok alkalmazása alapvető feltétele a kívánt termékminőség és teljesítőképesség biztosításának. A mechanikai aktiválás (finomörlés) olyan fizikai-kémiai állapotváltozást hoz létre az anyagban, amely fokozza az oldódást és a polikondenzációt, ezáltal érdemben javítja a kötőanyagok teljesítményét (Marjanović N. és munkatársai 2014; Mucsi G. és munkatársai 2015).

A fentiekkel összefüggésben jelen tanulmány a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet (NyKI) több évtizedes munkáját kívánja összefoglalni az ipari melléktermékek és egyéb nyersanyagok mechanikai aktiválása terén végzett kutatásokon keresztül, fókuszálva azok cementhelyettesítő anyagként, valamint alkáli aktivált rendszerek alapanyagaként történő felhasználására.

## **2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK**

### **2.1. Anyagok**

Az NyKI kiterjedt kutatásokat végzett (és végez mind a mai napig) különböző ipari melléktermékek cementhelyettesítő anyagként, valamint alkáli aktivált kötőanyag rendszerek potenciális alapanyagaként történő alkalmazhatóságának vizsgálatára. A vizsgálatok középpontjában kezdetben mindkét esetben a (deponált) erőműi pernye állt, amely nagy mennyiségben áll rendelkezésre és előnyös kémiai és fizikai tulajdonságai révén kiemelt szerepet tölt be a fenntartható építőanyagfejlesztésben. A pernyét kedvező szilikátkémiai tulajdonságainak köszönhetően (Opoczky L. 2001) a betongyártásban közvetlenül vagy a cementgyártás során cementkiegészítő anyagként használják fel. Deponált állapotban azonban reakcióképességük idővel csökken (passzíválódnak), ezáltal kevésbé lesznek alkalmasak közvetlen hasznosításra. Ezért annak érdekében, hogy a továbbiakban is felhasználhatók legyenek, a korábban említett eljárás technikai műveletekkel minőségük javítására van szükség.

Az NyKI 2010-ben kezdett el foglalkozni alkáli aktivált kötőanyagok (geopolimerek) fejlesztésével, melyek kezdetben a magyarországi erőműi pernyék (lignitpernye, deponált barnaszén- és feketeszénpernye) hasznosítására fókuszáltak. 2013-tól az Intézetben olyan kutatások indultak, amelyek a pernye mellett egyéb, döntően hazai ipari melléktermékeket (pl. vörösiszap, különféle salakok), és primer ásványi nyersanyagokat (kaolin, pumicit, agyag, perlit) vizsgáltak geopolimer kötőanyag alapanyagaként.

## 2.2. Módszerek

Mind a hidraulikus kötőanyag, mind a geopolimer kutatások az alapanyagok szemcseméretének csökkentésére és reakcióképességének fokozására fókuszáltak mechanikai aktiválás alkalmazásával a késztermék mechanikai teljesítményének javítása érdekében.

Az ipari melléktermékek és primer ásványi nyersanyagok mechanikai aktiválásához hagyományos laboratóriumi golyósmalmok mellett nagy energiasűrűségű berendezéseket – bolygó-, vibrációs- és keverőmalmokat – alkalmaztak. A kutatások kiterjedtek az őrlési paraméterek (ügymint az őrlési idő, fordulatszám, őrlőközeg és anyag töltési fok) optimalizálására a kívánt szemcseméret és végfelhasználási cél-nak megfelelően. Általánosságban elmondható, hogy a kutatásokban döntően 5–120 perces golyósmalmi, 10-120 perces vibrációs malmi, 1-60 perces bolygómalmi vagy 1-10 perces keverőmalmi mechanikai aktiválás fordul elő (Csóke B. és munkatársai 2007a; Mucsi G. és munkatársai 2009; Mucsi G. és munkatársai 2015). Mechanikai aktiválás hatására az anyagban bekövetkező változások nyomon követésére jellemzően lézeres szemcseméret-analízist, Blaine vagy BET módszerrel végzett fajlagos felület mérést, valamint puccolános aktivitás vizsgálatot (mészfelvétel vizsgálatot) alkalmaztak. A szerkezeti változások detektálására Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR), röntgen pordiffrakciós fázis-elemzés (XRD) és pásztázó elektronmikroszkópia elemzés (SEM), míg a mechanikailag aktivált anyagok felhasználásával készült hidraulikus vagy geopolimer kötőanyagok vizsgálatára szilárdsági teszteken és FTIR, XRD, SEM elemzéseken túl izotermikus kalorimetria (ICC) szolgált (Csóke B. és munkatársai 2007a; Mucsi G. és munkatársai 2009; Mucsi G. és munkatársai 2015; Szabó R. és munkatársai 2023).

## 3. EREDMÉNYEK

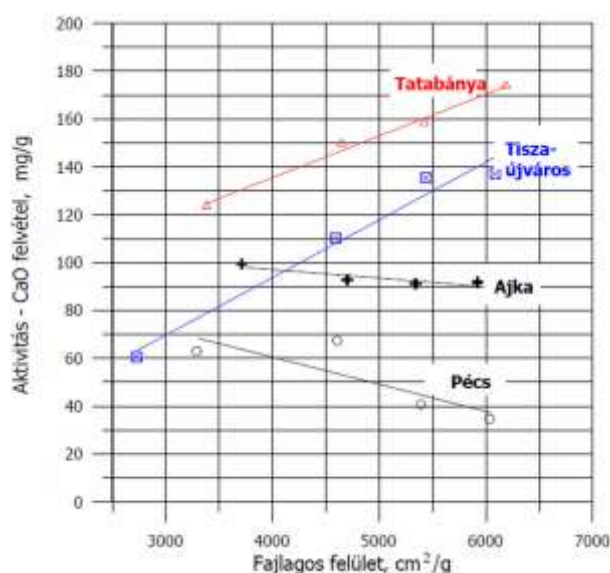
Csóke Barnabás meghatározó szerepet játszott a nyersanyagelőkészítés és finomőr-lés hazai fejlesztésében. 2000-es évektől kezdődően irányítása alatt több olyan projekt is futott a Miskolci Egyetem NyKI-ében, amelyek a pernyehasznosítás lehetőségeivel foglalkoztak. Az alábbiakban néhány kiemelt kutatási eredményt mutatunk be példákon keresztül.

### 3.1. Pernyealapú hidraulikus kötőanyag fejlesztések

A GVOP-3.1.1.-2004-05-0113/3.0 számú „Pernyebázisú kötőanyag előállítását szolgáló technológiai rendszer kifejlesztése” című projekt keretén belül (2005-2007) a pernye alkalmazhatóságát vizsgálták a H-TPA Innovációs és Minőségvizsgáló Kft-vel, a Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft-vel és az IHU Ipari Hulladékhasznosító Nonprofit Kft-vel alkotott konzorciumban. A kutatás háromfé-

le savanyú (tiszaújvárosi, pécsi, tatabányai) és egy bázikus (ajkai) pernye vizsgálata terjedt ki.

A kutatások kimutatták egyrészt, hogy a pernye mechanikai aktiválásával a puccolános aktivitásuk módosítható (1. ábra), másfelől rámutattak arra, hogy a pernye megfelelő előkészítése lehetőséget biztosít mechanikailag aktivált erőműi pernye és mész keverékéből készült, minőséggarantált kötőanyag előállítására (Csőke B. és munkatársai 2007a; Csőke B. és munkatársai 2008a, Mucsi G. és munkatársai 2009) szabadalmaztatott eljárás keretében (Csőke B. és munkatársai 2007b), amely útépítésben védőréteg építésére, valamint pályaszerkezeti réteg alaprétegének kialakítására nagy mennyiségben felhasználható, a költségek csökkenésével pedig elősegítve a minél gazdaságosabb útépítést (2. ábra).



**1. ábra**

*Pernyeminták mészfelvétel vizsgálati eredményei az őrlemény fajlagos felületének függvényében (Mucsi G. és Csőke B. 2014).*

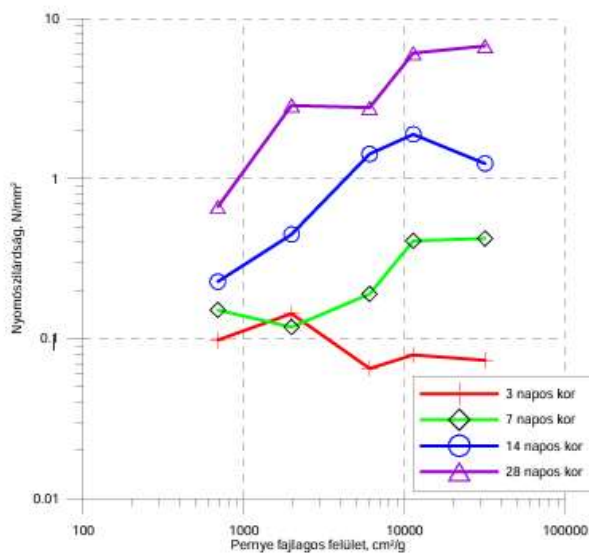
A kutatás megállapította továbbá, hogy építő- és építőanyag-ipari kötőanyagként a nem hidraulikus (savanyú) pernye kizárólag bázikus katalizátor (pl. mészhidrát) hozzáadásával jöhet számításba. Emellett nem zárható ki a savanyú és az önálló kötőképességgel rendelkező bázikus pernye megfelelő arányú keverékének ilyen célú hasznosítása sem (Gáspár L. és Mucsi G. 2014).



2. ábra

*A próbaútszakasz építéséről készült fotók (Csőke B. és munkatársai 2008b).*

A témához kapcsolódóan további kutatásokat is végeztek hidraulikus mikrokötőanyag előállítására (Mucsi G. és Csőke B. 2013), valamint különféle melléktermékek (pl. mészégető kemencepor) és pernye együttes felhasználására hidraulikus kötőanyag előállítására céljából (Mucsi G. és munkatársai 2011b). A vizsgálatok egyértelműen bebizonyították, hogy a mechanikailag aktivált erőműi pernye potenciális alapanyaga lehet a hidraulikus kötőanyag fejlesztéseknek.



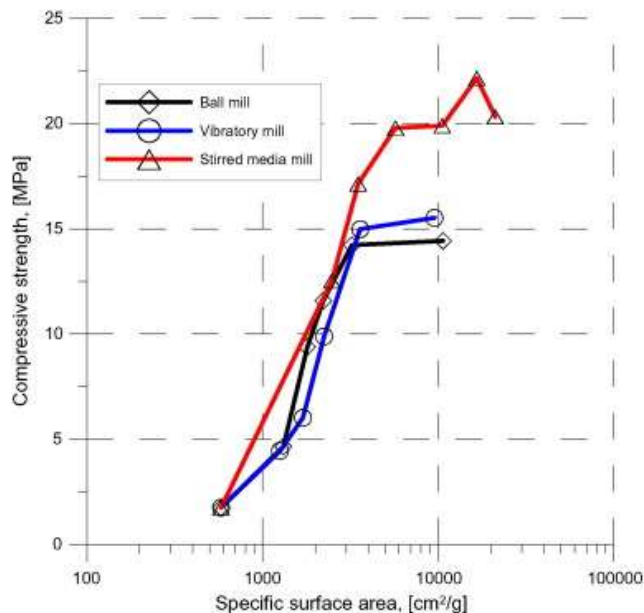
3. ábra

*Fajlagos felület hatása a mikrokötőanyag habarcs szilárdságára (Mucsi G. és Csőke B. 2013).*

### **3.2. Pernyealapú geopolimer kutatások**

Az NyKI-ben Csőke Barnabás és Mucsi Gábor munkásságának köszönhetően 2010-ben indultak meg pernyealapú alkáli aktivált kötőanyagok (geopolimerek) fejlesztésére irányuló kutatások (Mucsi G. és munkatársai 2010). Ennek alapját a fentebb bemutatott, pernyehasznosításra irányuló hidraulikus kötőanyag kutatások eredményei és a nemzetközi partnerségi kapcsolatok (CSIR-National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India) jelentették. Az első geopolimer-kutatások a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 azonosítójú projekt keretében valósultak meg. A projekt egyik kiemelt célja az volt, hogy a Magyarországon jelentős mennyiségben rendelkezésre álló ipari aluminoszilikát-hulladékok (például pernye, bányameddők, valamint téglá-, cserép- és üvegtörmelék) újrahasznosítására innovatív, nagyipari technológiákat dolgozzanak ki. E technológiák révén új, versenyképes építőipari termékek (pl. téglá, falazó- és burkolóelemek) és alapanyagok előállítására vált lehetővé, amely a hazai geopolimer gyártás kísérleti és tudományos megalapozását szolgálta (Mucsi G. és Csőke B. 2013).

A pernye hasznosíthatóságának vizsgálata kiemelt szerepet kapott a 2012–2014 között megvalósult Indo–Hungarian Tét (GEOPOL10) projekt keretében, amely magyar–indiai együttműködésben zajlott. A kutatás központi célja a geopolimer tulajdonságainak szabályozása volt, amelyet a pernye különböző malmokban történő mechanikai aktiválásával értek el (Mucsi G. és munkatársai 2013). Az eredmények egyrészt feltárták a pernye szemcsemérete és reakcióképessége közötti összefüggést (Kumar S. és munkatársai 2015), másrészt igazolták, hogy a hazai deponált pernyék reakcióképessége mechanikai aktiválás révén jelentősen növelhető, ami kedvezően befolyásolja a geopolimerek szerkezetét és tulajdonságait (4. ábra) (Mucsi G. és munkatársai 2015; Kumar S. és munkatársai 2017).



4. ábra

*Geopolimer nyomószilárdsága a pernye fajlagos felületének függvényében (Mucsi G. és munkatársai 2015).*

A mechanikailag aktivált pernyealapú geopolimerek megalapozó kutatásaira építve, 2013–2014 között megvalósult „Eredetjelölt környezetbarát építőipari anyagok előállítása szilikát-tartalmú ipari melléktermékekből” című (GOP-1.1.1-1-2012-0379) projekt keretében került sor a geopolimer betonok szisztematikus vizsgálatára. A kutatási eredmények igazolták, hogy a hazai ipari melléktermékek, mint például erőművi pernye, vörösiszap és kohászati salak szinergikus hasznosításával olyan geopolimer beton (5. ábra) fejleszthető, amely megfelelő szilárdsági és fagyállósági tulajdonságokkal rendelkezik (Mucsi G. és munkatársai 2014).



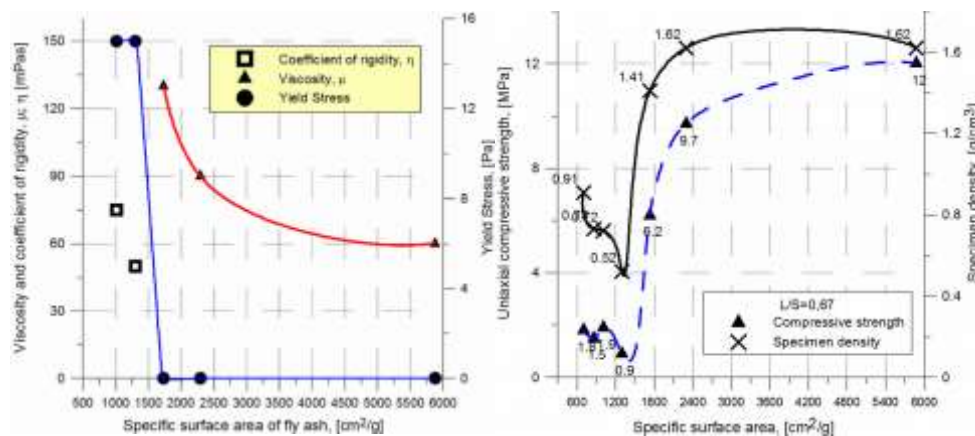
**5. ábra**

*Geopolimer beton (Szabó R. és Mucsi G. 2023).*

A megalapozó geopolimer kutatásoknak köszönhetően 2014-től az Intézetben olyan kutatások indultak hazai és nemzetközi együttműködések keretében, amelyekben a pernye mellett további, döntően hazai ipari hulladékok, úgymint vörösiszap, salakok, szénelgázosítási maradványanyagok, szénbányászati meddő, építési és bontási hulladékok (elsősorban beton), valamint primer nyersanyagok, mint a kaolin, agyag, pumicit és perlit is geopolimer kötőanyag alapanyagaként kerültek felhasználásra.

Az NyKI-ben folytatott pernyealapú geopolimer kutatások körében kiemelendő továbbá Szabó R. és munkatársai (2017) munkája. Vizsgálataik során igazolták, hogy a mechanikai aktiválással módosított pernye alkalmazása jelentős hatást gyakorol a geopolimer paszta reológiai (folyási) tulajdonságaira. Ez a változás kulcsfontosságú a habosított geopolimerek (ún. geopolimer habok) pórusszerkezetének kialakulásában, amely közvetlenül befolyásolja az anyag mechanikai tulajdonságát (6. ábra).

Az NyKI-i geopolimer kutatások összefoglalását a Szabó és Mucsi (2023) által publikált cikk tartalmazza.



6. ábra

*Pernyefinomság hatása a geopolimer paszta reológiájára (bal) és szilárdságára (jobb) (Szabó R. és munkatársai 2017).*

#### 4. ÖSSZEFOGLALÓ

Jelen tanulmány Csőke Barnabás professzor és kutatócsoportjának több évtizedes munkáját foglalja össze, amely az ipari melléktermékek és egyéb ásványi anyagok mechanikai aktiválására irányuló kutatásokra épül. Csőke Barnabás kiemelkedő szerepet játszott a fenntartható építőanyag-fejlesztésben, különösen a cementhelyettesítő anyagok és geopolimer kötőanyagok előállításában. Kutatásainak középpontjában a mechanikai aktiválás állt, amelynek célja az ipari melléktermékek, elsősorban deponált erőműi pernyék reakcióképességének növelése. Eredményei rávilágítottak arra, hogy a golyósmalmi, valamint a nagy energiasűrűségű vibrációs-, bolygó- és keverőmalmi őrlés jelentősen javítja az alapanyagok felületi tulajdonságait, ami kedvezően hat a puccolános aktivitásra, a geopolimerizáció folyamatára és végső soron a termék mechanikai szilárdságára. Kutatásai bizonyították, hogy az őrlési paraméterek optimalizálása kulcsfontosságú mind a hidraulikus, mind a geopolimer kötőanyagok előállításában.

Csőke munkássága nemcsak laboratóriumi környezetben, hanem ipari alkalmazásokban is jelentős, mivel a mechanikai aktiválás hatásait komplexen vizsgálta az őrlési paraméterek, a szemcseméret-eloszlás, a reakcióképesség és a szilárdsági mutatók összefüggésében. Eredményei megalapozták a hazai ipari melléktermékek magas hozzáadott értékű hasznosítását, és olyan módszertani alapokat teremtettek, amelyek lehetővé tették a kutatócsoport számára további hulladékáramok, mint pl. üvegpors, perlit, építési és bontási hulladék mechanikai aktiválásának vizsgálatát. Munkája irányt mutat a körforgásos gazdaság elveit támogató innovatív technológiák fejlesztéséhez, és biztosítja azt a tudományos és gyakorlati alapot, amelyre a későbbi kutatások épülhetnek.

## **KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar dolgozóinak, és mindazoknak az ipari partnereknek, akik a tanulmányban bemutatott kutatásokban részt vettek.

## **HIVATKOZÁSOK**

- [1.] Wu S., Shao Z., Andrew R.M., Bing L., Wang J., Niu L., Liu Z., Xi F.: Global CO<sub>2</sub> uptake by cement materials accounts 1930–2023. SCIENTIFIC DATA 11, 1409. (2024) <https://doi.org/10.1038/s41597-024-04234-8>
- [2.] Lippiatt N., Ling T.-C., Pan S.-Y., Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement-based materials and the future perspective. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING 28, 101062. (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101062>.
- [3.] Csőke B., Mucsi G., Opoczky L., Gável V.: Modifying the hydraulic activity of power station fly ash by grinding. CEMENT INTERNATIONAL 5(6), pp. 86-93. (2007a)
- [4.] Mucsi G., Csőke B.: Erőművi pernyék fizikai és kémiai tulajdonságai. in: Mucsi G., Criticel monográfia sorozat 6. Erőművi pernye komplex hasznosítása. Miskolc, Milagrossa Kft. pp. 67-79. (2014) ISBN: 978-615-80073-1-3.
- [5.] Mucsi G., Csőke B., Rácz Á. Vitalis L.: Evaluation of the separation efficiency of a classifier for producing composite cement. CEMENT INTERNATIONAL 9(2), pp. 50-57. (2011a)
- [6.] Kumar S., Kristály F., Mucsi G.: Geopolymerisation behavior of size fractioned fly ash. ADVANCED POWDER TECHNOLOGY 26(1), pp. 24-30. (2015) <http://dx.doi.org/10.1016/j.appt.2014.09.001>
- [7.] Szabó R., Kristály F., Mucsi G.: Altering reactivity of kaolin by classification and mechanical activation. In: IMPC 2020 - XXX International Mineral Processing Congress Proceedings, CAPE TOWN, South Africa, 18-22 October (2020) pp 534–543.
- [8.] Szabó R.; Kristály F.; Dolgos F.; Ambrus M.; Mucsi G.: The combined influence of classification and mechanical activation of kaolin on the structure and properties of geopolymer. CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS 22, e04876. (2025) <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04876>
- [9.] Kumar, S., & Kumar, R.: Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. CERAMICS INTERNATIONAL 37, pp. 533–541. (2011) <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.09.038>

- 
- [10.] Mucsi G., Kumar S., Csőke B., Kumar R., Molnár Z., Rácz Á., Máday F., Debreczeni Á.: Control of geopolymer properties by grinding of land filled fly ash. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING* 143, pp. 50–58. (2015) <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.08.010>
- [11.] Mucsi G.: Mechanical activation of power station fly ash by grinding – A review. *ÉPÍTŐANYAG – JOURNAL OF SILICATE BASED AND COMPOSITE MATERIALS* 68(2), pp. 56-61. (2016) <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2016.10>
- [12.] Smekal A. G.: *Proceedings of the International Symposium on the Reactivity of Solids* (ed. Hedvall, J. A.). Gothenburg (1952)
- [13.] Juhász A.Z., Opoczky L.: *Mechanical Activation of Minerals by Grinding, Pulverizing and Morphology of Particles*, Akadémiai Kiadó - Ellis Horwood Ltd Publishers. Budapest – Chichester (1990)
- [14.] Mucsi G.: A review on mechanical activation and mechanical alloying in stirred media mill. *CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH AND DESIGN* 148, pp. 460-474. (2019) <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.06.029>
- [15.] Davidovits J.: *Geopolymer chemistry and application*. Published by: Institut Geopolimère, Saint-Quentin, France, (2011) ISBN: 9782951482050
- [16.] Provis J. L., van Deventer J. S. J.: *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. (2009) ISBN 978184569-4494.
- [17.] Marjanović N., Komljenović M., Baščarević Z., Nikolić V.: Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through mechanical activation. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS* 57, pp. 151-162. (2014) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.095>
- [18.] Opoczky L.: A pernyék szilikátkémiai tulajdonságai. *ÉPÍTŐANYAG* 53(4), pp. 105-108. (2001)
- [19.] Mucsi G., Csőke B., Gál A., Szabó M.: Mechanical activation of lignite fly ash and brown coal fly ash and their use as constituents in binders. *CEMENT INTERNATIONAL* 7(4), pp. 76-85. (2009).
- [20.] Szabó R., Kristály F., Nagy S., Singla R., Mucsi G., Kumar S.: Reaction, structure and properties of eco-friendly geopolymer cement derived from mechanically activated pumice. *CERAMICS INTERNATIONAL* 49(4), pp. 6756-6763. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.204>
- [21.] Csőke B., Mucsi G., Karoliny M., Sík Cs., Gáspár L., Erőss Gy., Juhász I.: *Eljárás és berendezés minőség-garantált örlt pernye és méshidrátt-bázisú kötőanyag előállítására. szabadalom, HU P0700645, (2007b).*

- [22.] Csőke B., Mucsi G., Sík Cs.: Mechanical activation of fly ash and its utilization as individual binding material. XXIV. International Mineral Processing Congress, BEIJING, China (2008a), pp. 3262-3269. ISBN 978-7-03-022711-9
- [23.] Gáspár L., Mucsi G.: Pernye az útépítésben. in: Mucsi G., Criticel monográfia sorozat 6. Erőművi pernye komplex hasznosítása. Miskolc, Milagrossa Kft. pp. 126-139. (2014) ISBN: 978-615-80073-1-3.
- [24.] Csőke B., Mucsi G., Sík Cs.: Production and practical application of mechanically activated fly ash-based binding material. Proceedings of the 6th International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying, INCOME 2008, JAMSHEDPUR, India, 1-4 December (2008b), pp. 299-305.
- [25.] Mucsi G., Csőke B.: Geopolimer és hidraulikus mikrokötőanyag kutatása. MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 84(2) pp. 29–37. (2013).
- [26.] Mucsi G., Debreczeni Á., Máday V., Dudok T., Csőke B.: Development of hydraulic binder using industrial wastes. ÉPÍTŐANYAG 63 (1-2), pp. 28-32. (2011b) <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2011.6>
- [27.] Mucsi G., Csőke B., Molnár Z.: Laboratory investigation of geopolymer production from industrial waste materials. In: XII. International Mineral Processing Symposium, IMPS 2010, NEVSEHIR, Turkey, 06-08 October (2010) pp. 1235-1242.
- [28.] Mucsi G., Csőke B., Máday F., Debreczeni Á., Rácz Á., Molnár Z.: Fine grinding of deposited fly ash carried out in various mills in order to improve the geopolymer properties. Proceedings of XV Balkan Mineral Processing Congress, SOZOPOL, Bulgaria, 12-16 June (2013) pp. 864-868.
- [29.] Kumar S., Mucsi G., Kristály F., Pekker P.: Mechanical activation of fly ash and its influence on micro and nano-structural behaviour of resulting geopolymers. ADVANCED POWDER TECHNOLOGY 28(3), pp. 805–813. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.ap.2016.11.027>
- [30.] Mucsi G., Rácz Á., Molnár Z., Szabó R., Gombkötő I., Debreczeni Á.: Synergetic use of lignite fly ash and metallurgical converter slag in geopolymer concrete. MINING SCIENCE, 21, pp. 43–55. (2014) <https://doi.org/10.5277/ms142104>
- [31.] Szabó R., Gombkötő I., Svéda M., Mucsi G.: Effect of grinding fineness of fly ash on the properties of geopolymer foam. ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS 62(2B), pp. 1257–1261. (2017) <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0188>

- [32.] Szabó R., Mucsi G.: Nyersanyag-előkészítés szerepe a hulladék alapú geopolimerek fejlesztésében. in: Faitli J. (szerk), 100 éves a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet - Szemelvények az Intézet szakmai-tudományos eredményeiből. Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, pp. 192-212. (2023), ISBN 978-615-5626-88-3

## VÁROSI BÁNYÁSZAT: ELEKTRONIKAI HULLADÉKOK, RONCSAUTÓK

NAGY SÁNDOR<sup>1</sup>, FAITLI JÓZSEF<sup>2</sup>, BOKÁNYI LJUDMILLA<sup>3</sup>, MÁDAINÉ  
ÜVEGES VALÉRIA<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar,  
Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet

<sup>1</sup>[sandor.nagy@uni-miskolc.hu](mailto:sandor.nagy@uni-miskolc.hu)

<sup>2</sup>[jozsef.faitli@uni-miskolc.hu](mailto:jozsef.faitli@uni-miskolc.hu)

<sup>3</sup>[ljudmilla.bokanyi@uni-miskolc.hu](mailto:ljudmilla.bokanyi@uni-miskolc.hu)

<sup>4</sup>[valeria.uveges@uni-miskolc.hu](mailto:valeria.uveges@uni-miskolc.hu)

<sup>1</sup>ORCID: 0009-0002-3156-2842

<sup>2</sup>ORCID: 0000-0002-4037-5208

<sup>3</sup>ORCID: 0000-0003-2038-6556

<sup>4</sup>ORCID: 0000-0003-4515-0697

**Absztrakt:** A Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karának Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézete számos jelentős projekt és ipari megbízás keretén belül foglalkozott elektronikai hulladékok, roncsautók feldolgozásával, előkészítési technológia kidolgozásával. Az intézetben már a 70-es években megjelentek a másodnyersanyagokkal kapcsolatos kutatások, de a 90-es években tűzte zászlójára az intézet vezetése – Prof. Dr. habil Csőke Barnabással az élen - e terület kiemelten történő művelését. Ebben a cikkben ismertetésre kerülnek a jelentős számban, és különböző területeken alkalmazott elektronikai eszközök felépítésével, és – első sorban - mechanikai előkészítésével kapcsolatos eredmények, lehetőségek az LCD kijelzők, Li-ion akkumulátorok, roncsautók, autó elektronikák példáján.

**Kulcsszavak:** elektronikai hulladék, Li-ion akkumulátor, LCD kijelző, roncsautó

### 1. BEVEZETÉS ÉS SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

*Elektronikai hulladékok fajtái és mennyiségei*

A 20-as évekre hatalmasra nőtt a megtermelt hulladékok mennyisége. Világviszonylatban az évente keletkező elektronikai hulladékok mennyisége elérte az 62 millió tonnát (2022), és 2030-ra már 80 millió tonnát jeleznek előre. Jelentős kihívás, hogy az elektronikai hulladék feldolgozó kapacitás messze elmarad a termelt mennyiségektől [Web1, Web5]. A növekedés okai: az egyre többféle elektronikai eszköz megjelenése (pl. akkumulátoros változatok megjelenése); az eszközök világviszonylatban egyre több emberhez történő eljutása; az eszközök élettartamának csökkenése; valamint a technológiák gyors változása. Utóbbira jó példa, mikor egy jelentős sportesemény előtt sokan lecserélték hagyományos – még tökéletesen mű-

ködő – TV-jüket a minden tekintetben korszerűbb LCD TV-re, így téve élvezetesebbé a közvetítések megtekintését.

Jól megfigyelhető tendencia továbbá, hogy egyre több eszközben jelennek meg nyomtatott áramkörök, LCD kijelzők (pl. okos hűtő) és akkumulátorok (pl. akkumulátoros porszívó, ventilátor, forrasztópáka). Jellemző a gépjárművek (élettartamuk végére ért, sérült, vagy meghibásodott gépjárművek) esetén is megjelenő különféle elektronikai hulladékok, úgy, mint számítógépek (NyÁK-ok), szenzorok, Li-ion akkumulátorok, LCD kijelzők (személygépkocsik műszerei, autóbuszok, vasúti járművek kijelzői, reklámfelületei), LED fényforrások. Ezek a tendenciák – a kategóriák közti átfedések - nehezítik az egyes hulladék áramok elkülönített módon történő begyűjtését.

A hatályos EEB kategóriák a következő hat termékkör szerint csoportosíthatók:

- Hőcserélő berendezések (pl. hűtő- és fagyasztógép, légkondicionáló, hőszivattyú),
- Képernyők, monitorok és 100 cm<sup>2</sup>-nél nagyobb képernyőt tartalmazó berendezések,
- Lámpák (pl. fénycsövek, kompakt fénycsövek, LED lámpák, stb.),
- Nagygépek (bármely külső méret meghaladja az 50 cm-t),
- Kisgépek (egyik külső méretük sem haladja meg az 50 cm-t),
- Kisméretű számítástechnikai berendezések és távközlési berendezések (egyik külső méretük sem haladja meg az 50 cm-t).

#### *Körforgásos gazdaság*

EU környezetvédelmi és gazdaságpolitikájának egyik legfontosabb célkitűzése a körforgásos gazdaság irányába történő elmozdulás. A körforgásos gazdasági modellben minden nem megújuló anyag zárt körben kering (1 ábra). A körforgásos gazdaság termelési és fogyasztási modellje arra épül, hogy egyszeri fogyasztás helyett a termékek élettartamát a lehető legjobban meghosszabbítsuk. Erre alkalmas módszer lehet, ha vásárlás helyett kölcsönzünk, a már megvásárolt termékeknek pedig „második esélyt” adunk azzal, hogy megjavítjuk, átalakítjuk, esetleg továbbadjuk őket. Amikor az adott termék eléri az élettartama végét, akkor a szerkezeti anyagokat újra lehet hasznosítani. Így csökken a hulladék mennyisége, ráadásul az alapanyagok és késztermékek újbóli felhasználása gazdaságilag is értékteremtő [Web3].

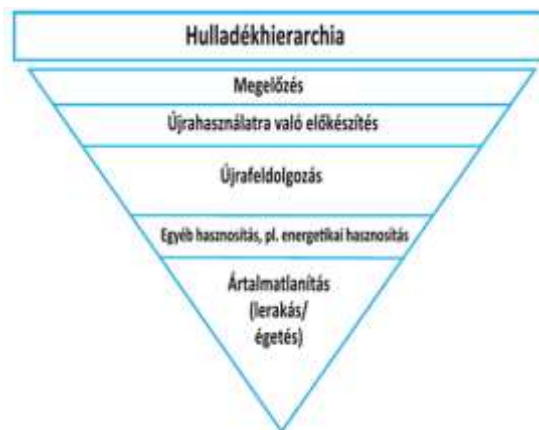
Ezzel szemben a hagyományos lineáris gazdasági modell (2. ábra) egyszeri fogyasztással számol. Emiatt a termékek olcsó, könnyen hozzáférhető alapanyagokból készülnek, az alacsonyabb minőségük miatt pedig nem is olyan tartósak [Web2, Web3, Web6]. Természetesen az elmúlt évtizedekben is jelentős törekvések voltak már az újrahasznosítás tekintetében, mind gazdasági, környezetvédelmi, ill. jogi megfontolásokból (3. ábra).



**1. ábra.**  
Körforgásos gazdaság modellje [Web6]



**2. ábra.**  
Lineáris gazdaság modellje [Web6]



**3. ábra**  
Hulladék hierarchia

### Kritikus elemek

A fémek, ásványi anyagok és természetes anyagok mindennapi életünk részét képezik. A kiemelkedő gazdasági jelentőségű és az ellátás szempontjából magas kockázatot jelentő nyersanyagokat kritikus fontosságú nyersanyagoknak nevezzük (1. táblázat). E nyersanyagok nélkülözhetetlenek számtalan ipari ökoszisztéma működéséhez és integritásához: például a mobil-telefonok rezgő hívásjeléhez volfrám

kell, a fénykibocsátó diódás (LED) technológiához galliumra és indiumra van szükség, a félvezetőkben szilíciumfémeket használnak, a hidrogén-cellák és az elektrolízátorok platinacsoportba tartozó fémeket tartalmaznak [Web4].

Az egyes nyersanyagok kritikus fontosságának meghatározásához használt két fő paraméter a gazdasági jelentőség és az ellátási kockázat. A gazdasági jelentőség megállapításához azt vizsgálják részletesen, hogy a nyersanyagok mely ipari alkalmazásokon alapuló végfelhasználásokhoz rendelkeznek hozzá. Az ellátási kockázattal kapcsolatban pedig az a mérvadó, hogy az elsődleges nyersanyagok globális termelése és az EU beszerzési forrásai egy-egy országban összpontosulnak-e, és ezeknek az országoknak milyen a politikai irányítása, de ide-tartoznak a környezetvédelmi szempontok is, az újrafeldolgozás (azaz a másodlagos nyersanyagok) részaránya, a helyettesíthetőség, az EU importfüggősége, valamint a harmadik országokkal szemben alkalmazott kereskedelmi korlátozások is [Web4].

**1. táblázat.** *Kritikus fontosságú nyersanyagok (2023 évi állapot) [Web4]*

2023 Kritikus nyersanyagok (Critical Raw Materials 34)			
Antimon	Folypát	Magnézium	Fém szilícium
Barit	Gallium	Természetes grafit	Tantál
Bauxit	Germánium	Titán	Vanádium
Berillium	Hafnium	Nióbium	Wolfram
Bizmut	Nehéz ritkaföldf.	Platina csoport	Stroncium
Borátok	Kobalt	Foszfáttartalmú kőzet	Foszfor
Lítium	Kokszszen	Könnyű ritkaföldf.	Szkandium
Arzén	Földpát	Réz	Nikkel
Mangán	Hélium		

A kritikus stratégiai elemek hazai nyersanyagforrásokból történő előállítására alapvetően három út kínálkozik Csőke és szerzőtársai szerint (2013):

- 1) egyrészt a primer érces ásványelőfordulások anyagának bányászati kitermelése, előkészítése és kohászati feldolgozása;
- 2) másrészt az érces ásványok bányászati meddőinek kitermelése, előkészítése és kohászati feldolgozása, valamint a szenek kitermelése és energetikai hasznosítása maradékanyagai és melléktermékeiből történő kinyerése;

- 3) harmadrészt a lakossági és ipari célra gyártott és elhasznált elektronikai eszközök alkatrészeiben, szerkezeti anyagaiban rejlő kritikus elemek kinyerése – városi bányászat.

Jelen munka az újonnan nagy számban megjelenő elektronikai hulladékok témakörével foglalkozik, kiemelten azokkal, melyek több hulladékáramban is megtalálhatók. Az elektronikai hulladékok előkészítésének a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézetében jelentős hagyománya van, számos ipari megbízás, projekt és diplomamunka fókuszált és fókuszál e témakörre [1-5, 7-12, 14-20].

## 2. A MECHANIKAI ELŐKÉSZÍTÉS JELENTŐSÉGE

A mechanikai eljárások (szétszerelés, aprítás, osztályozás-szítálás, szétválasztás-szeperálás) célja, a hulladékok szemcséinek szétválasztása olyan szerkezeti anyagokra, összetevőkre, amelyek részben közvetlenül újrahasznosíthatók, ill. lehetőség teremtése arra, hogy kémiai, akár biológiai eljárások alkalmazásával az alkotó anyagok (elemek) közvetlenül vagy vegyület formájában visszanyerhetők legyenek Bokányi (2020) és Csőke és szerzőtársaik (2008) alapján.

Az aprítás, ill. szétválasztás általános sémáját a következő ábra mutatja, melynek során az aprítást követően a szerkezeti anyagok (esetleg alkatrészek) feltárt állapotba kerülnek, alkalmassá válnak a különböző fizikai tulajdonságok eltérésén alapuló szétválasztásra.



**4. ábra.**

*Aprítás és szétválasztás kapcsolata*

Amíg a színesfémek leggyakrabban vastagabb rétegekben (nagyobb méretben) fordulnak elő, addig a nemesfémeket vékonyabb rétegekben találjuk, a kritikus elemek (és részben a nemesfémek) pedig rendszerint ötvözetalkotók (vagy hintetten beépülnek az alapanyagba). Ebből következően, amíg a színesfémek aprítást

követően fizikai szeparálás útján is jórészt visszanyerhetők, addig a nemesfémek és a kritikus elemek, már csak kémiai (és/vagy biokémiai) úton tárhatók fel és választhatók le (5. ábra) [1].



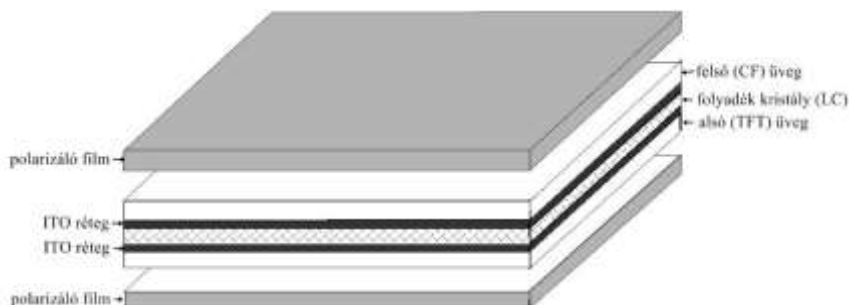
5. ábra.

*Elektronikai hulladékok előkészítésének általános törzsfája*

A további fejezetekben néhány kiemelt, napjainkban fontos alkatrész, ill. eszköz előkészítésének kérdéseiről lesz szó, alapvetően a Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet vizsgálataira alapozva.

### 3. LCD KIJELZŐK

Jelenleg az LCD és az OLED a két meghatározó technológia a kijelzők piacán. TV készülékekből nagyságrendileg 300 millió darabot értékesítenek éves szinten világszerte. Az LCD kijelzők háttérvilágítása a jelenleg gyártott típusoknál LED. A síkképernyők legfontosabb kritikus eleme az indium. Az indium egy igen értékes fém, amelyet cink ércek bányászata során, annak melléktermékeként állítanak elő. Az ilyen módon kinyerhető (primer nyersanyagból) indium mennyisége 1-től 100 g/t-ig terjed (Web2), amely alacsonyabb, mint az LCD kijelzőkben fellelhető fajlagos mennyisége, tehát az elhasznált LCD kijelzők értékes alternatív indiumforrások Csőke (2013), Buchert (2012) és Örsi (2019) nyomán. A Miskolci Egyetemen a Criticel projekt keretében, és egy ipari partner számára végeztünk kutatást, terveztünk technológiát, mindkét esetben Csőke Professor vezetésével.



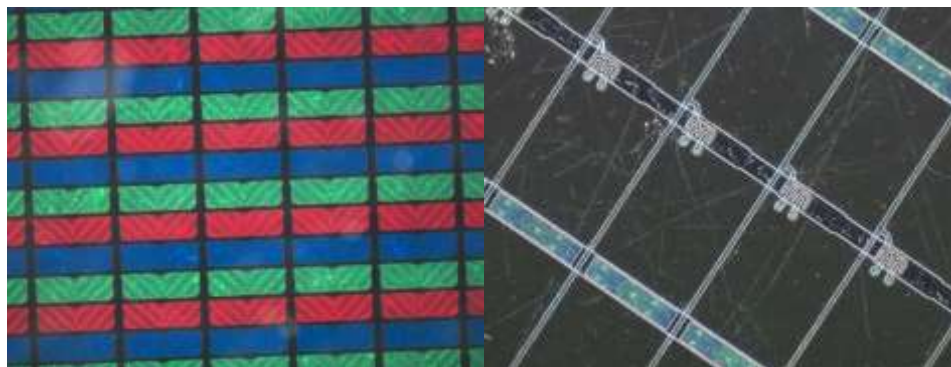
**6. ábra.**  
LCD panel felépítése

Az LCD két 0,4–1,1 mm vastag üveglemezből és műanyag fóliákból (polarizátorok, védőfóliák), összesen hat rétegből álló szendvicsszerkezet (6. ábra). Az üveglapok között az aktív folyadékkristály mellett vezető tulajdonságú indium-ónoxid (ITO), vékonyréteg tranzisztorok, egy orientációs réteg és színszűrők vannak. Az LCD-modul részei magán a panelen kívül még a háttérvilágítás, a vékonyréteg áramköri lemez, a kábel és a szerelvénykeret. Mivel az LCD panel önálló fényki-bocsátásra nem képes, a technológia háttérvilágítással egészül ki, melyet a folyadékkristályok orientációjuktól függően vagy átengednek, vagy nem (Csöke, 2014).

**2. táblázat.** LCD eszközök anyagi összetétele (szétbontás és tömegmérés alapján)

Alkatrészek típusa	LCD TV típus				LCD Monitor típus			
	JVC [kg]	JVC [%]	DiBO SS [kg]	DiBO SS [%]	DELL [kg]	DELL [%]	ACER [kg]	ACER [%]
Műanyag	5,54	50,46	4,68	34,41	2,08	38,10	1,78	45,88
Fém	3,3	30,05	6,6	48,53	2,56	46,89	1,34	34,54
LCD panel	1,14	10,38	1,06	7,79	0,46	8,42	0,38	9,79
NYÁK	0,8	7,29	1	7,35	0,32	5,86	0,32	8,25
Vezeték	0,14	1,28	0,14	1,03	0,02	0,37	0,04	1,03
Csavar	0,06	0,55	0,12	0,88	0,02	0,37	0,02	0,52
Összesen	10,98	100,0	13,6	100,0	5,46	100,0	3,88	100,0

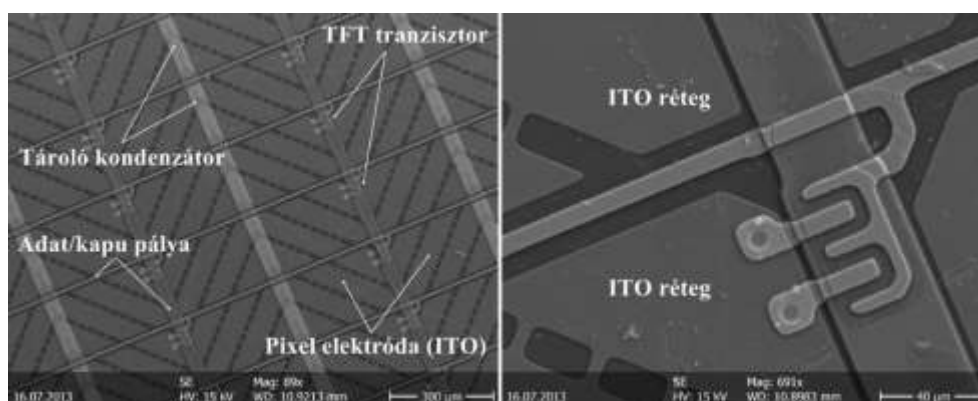
A fenti 2. táblázatból kitűnik, hogy az indiumot hordozó panel 8-10 %-t képvisel az elhasznált TV-kben és monitorokban. Optikai mikroszkópi felvételeket készítettünk a két üvegfajtáról (7. ábra).



7. ábra.

*CF (b) és TFT (j) üvegek mikroszkópi képe*

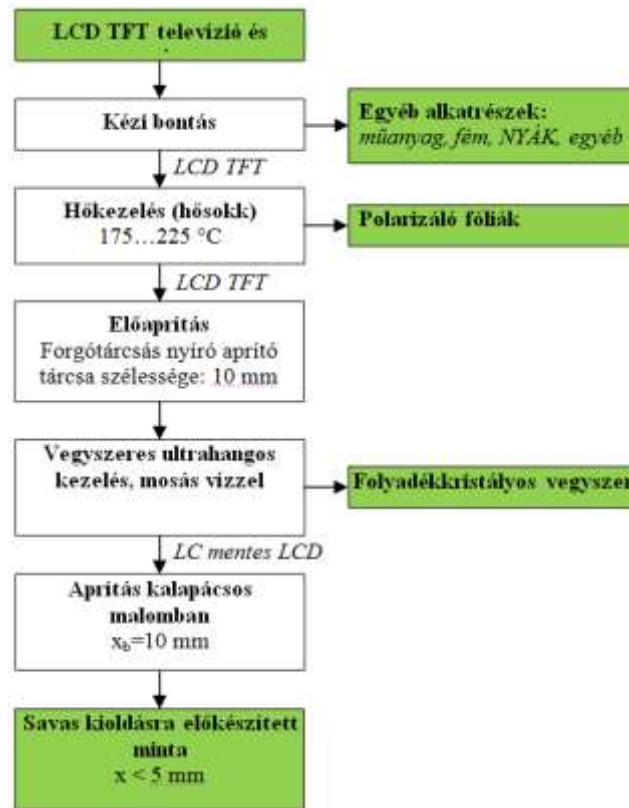
A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat elvégzésére a Miskolci Egyetem Ásványtani-Földtani Intézetében került sor. Az elemzés során az LCD panel TFT- és CF üvegének az elemzése, illetve a főbb alkotóinak a vizsgálata történt meg. Az elemzés során a TFT üvegről készült felvételeket a 8. ábra szemlélteti (Csőke et. al., 2013).



8. ábra.

*LCD panel TFT üvegéről (főliamenetes) készült SEM felvétel, a főbb alkatrész alkotók megjelölésével*

Kémiai összetétel elemzéseket elvégezve, a kapott mérési adatok alapján megállapítható, hogy a CF üveg arányaiban nagyobb indium tartalommal (228 mg/kg) rendelkezik, mint a TFT üveg (82 mg/kg). A vizsgálatok (technológia) folyamata a 9. ábrán látható Csőke et. al. (2014) és Nagy et. al. (2017) nyomán.



9. ábra.

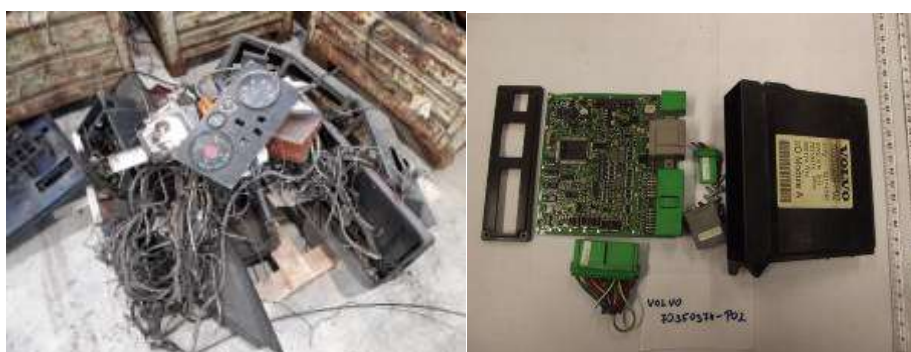
LCD kijelzővel végzett kísérletek (mechanikai előkészítés)

#### 4. RONCSAUTÓ ÉS HASZONGÉPJÁRMŰ FELDOLGOZÁS

Az élettartamuk végére ért gépkocsik feldolgozását illetően az intézet az ALCUFER Kft. vezetésével létrejött konzorciumban végezte el a roncsautó feldolgozás alap shredder technológiájának maradványait feldolgozó technológia eljárás-technikai tervezését („Roncsautók és elektronikai hulladékok szerves feldolgozási maradvékainak anyagában és energetikai úton történő hasznosítási vizsgálatait lehetővé tevő komplex hulladékkezelési rendszer kialakítása” című, GOP-1.1.1-08/1-2008-0061 pályázat). Egyes maradványanyagok több 10% tömegarányban tartalmaznak értékes fémeket, amik kinyerése már akkor alapvető érdeke volt a shredder technológiákat üzemeltető cégeknek gazdasági, környezetvédelmi és jogszabályi okokból. A 2009 és 2011 közt megvalósult projekt témavezetője a Miskolci Egyetem részéről Csőke Professor volt.

A haszongépjárművek, autóbuszok járműkategóriáinak feldolgozhatóságát vizsgálta az Alcufer Kft. vezetésével, a Miskolci Egyetem részvételével egy konzorcium a „Haszongépjárművek előkezelésére, szétszerelésére, bontására, újrahasznosítására

vonatkozó kutatás-fejlesztési program végrehajtása az OPTISOL konzorcium keretében” c. projekt megvalósítása során. A projekt keretén belül egy a haszongépjárművek feldolgozására alkalmas bontócsarnok is megvalósult Szolnokon (Alcufer Kft.). A vizsgálatok a járművek összetételének, ill. a bennük lévő értékes alkotók arányának megállapítására és bontási technológiájának kialakítására is kiterjedtek (10. ábra) (Gombkötő et. al., 2017; Oláh et. al., 2019). Az Egyetem az Alcufer Kft-vel együttműködve vasúti vonatójárművek bontási anyagmérlegét is meghatározta (11. ábra).



**10. ábra.**

*Ik260-as típusból származó elektromos alkatrészek (b) és VOLVO buszból származó számítógép*



**11. ábra.**

*Ik395 autóbusz szárazra fektetése (b), MÁV 431 (gyártó: Ganz) típusú villamos mozdony bontása*

Az elmúlt követő időszakban újabb kihívásokkal bővül a roncsautók feldolgozása, köszönhetően az elektromos autók elterjedésének, a bennük lévő különböző típusú akkumulátoroknak, elektronikai alkatrészeknek (vezérlő egységek, szenzorok, világítóttestek, kijelzők) köszönhetően.

## 5. LI-ION AKKUMULÁTOROK FELDOLGOZÁSA

A Li-ion akkumulátorok (12. ábra) terjedése töretlen, azonban a hulladékká vált akkumulátorok feldolgozására azonban számottevő kapacitás még nem áll rendelkezésre.



12. ábra.

*Főbb Li-ion akkumulátor alkalmazási területek (elektromos autó, kéziszerszám, mobiltelefon)*

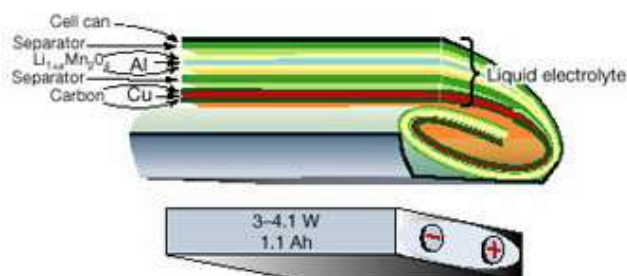
Feldolgozandó akkumulátorok nem csak az eszköz élettartamának végén keletkeznek (pl. autó élet tartamának vége), hanem az akkumulátorok sérülése, ill. meghibásodása esetén is. Bizonyos nagyobb méretű akkumulátorok, melyek kapacitása lecsökken, más alkalmazásra kerülhetnek (pl. energiatárolás épületekben). Kisebb méretű akkumulátorok esetén probléma, hogy egy részük a lakosságnál reked (pl. eltárolt korábbi mobiltelefonok), ill. más részük lerakókon végezheti (pl. készülékekbe beépített akkumulátor). A jelen kihívása a már forgalomban lévő, ill. forgalomba kerülő – különféle méretű és összetételű – Li-ion akkumulátorok későbbi feldolgozási lehetőségeinek kialakítása.

Az intézet több oldalról is vizsgálja a feldolgozási lehetőségeket. Vizsgálatokat folytattunk mobiltelefonból, laptopból és személygépkocsiból származó (kis teljesítményű akkumulátor hibrid járműből ill. akkumulátor elektromos autóból) akkumulátorok felépítését ill. mechanikai és akár bioeljárás-technikai előkészítését illetően.

A Li-ion akkumulátorok kémiai összetétele jelentős eltérést mutat a különböző típusok tekintetében, a főbb fajták: Lítium-kobalt-dioxid ( $\text{LiCoO}_2$ ), Lítium-mangán-oxid ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), Lítium-nikkel-mangán-kobalt-oxid ( $\text{LiNiMnCoO}_2$  vagy NMC), Lítium-nikkel-kobalt-alumínium-oxid ( $\text{LiNiCoAlO}_2$  vagy NCA), Lítium-titán ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), Lítium-vas-foszfát ( $\text{LiFePO}_4$ ). Felépítésük többféle lehet, a főbb alkatrészeik a következők (13. ábra):

- katód (alumínium gyűjtőfólia és lítium-fémoxid fő alkotójú bevonat),
- szeparátor film: PE/PP fólia,
- anód (réz gyűjtőfólia, grafit fő alkotójú bevonat),

- elektrolit (szerves oldószer, sók, adalékok),
- burkolat, ház (alumínium, fóliák, csatlakozók, keret, elektronika, hűtőrendszer, stb.)



**13. ábra.**

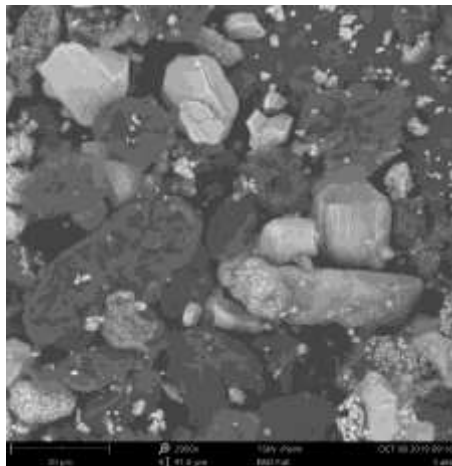
*Li-ion akkumulátor felépítése (példa) [6]*



**14. ábra.**

*Szétbontott mobil telefon akkumulátor: anód és katód tekercek (b), ház és black mass bevonat (j) [7]*

A mobiltelefonokból származó akkumulátorok (24 db-os minta, 14. ábra) esetén a következő folyamat szerint jártunk el: sóoldatban történő kisütés 24 órán át; aprítás kalapácsos törővel (20 mm-es szitabetéttel), durva frakció (>0,5 mm) szeparálása légáramkészülékkel és elektrodinamikus szeparátorral; értékes fémeket tartalmazó finom frakció (<0,5 mm) további - nem mechanikai - feldolgozása. SEM vizsgálatot végeztünk a <0,5 mm-es frakción (black mass anyaga), mikroszondás mérés alapján (15. ábra) a katód világosabb szemcsék jelentős kobalt tartalommal bírtak (61,4 %), az anód sötétebb szemcsék 86,8 %-ban szenet tartalmaztak Orosz et. al. szerint (2019).



**15. ábra.**

*0,5 mm alatti szemcsék SEM vizsgálata [7]*

A gépkocsikból származó akkumulátorok is igen eltérőek lehetnek, a 16. ábra két jellemző példát mutat: hibrid gépkocsiból származó, kis kapacitású akkumulátor rozsdamentes, oldhatatlan kötással lezárt rozsdamentes acél házban, ill. elektromos autóból származó, kibontott akkumulátor cella vékony alumínium házban (mindkét mintát az Auto Mandy Car Kft. partnerünkötől kaptuk). Utóbbinak a gépi aprítását elvégeztük forgótárcsás nyíró aprító berendezésben.



**16. ábra.**

*Hibrid személyautó kis teljesítményű Li-ion akkumulátora (j), elektromos jármű Li-ion akkumulátor cellája (fénykép: Pataki Gábor) (b)*

A Li-ion akkumulátorok esetén is kiemelt szereppel bír a mechanikai előkészítés, legtöbb technológiának ez az első része, ezt követi a hidrometallurgiai feldolgozás. Speciális igény az akkumulátorok kisütése az aprítás előtt. Az aprítás nedves és száraz módon is történhet (pl. védőgáz közegben) a kigyulladás elkerülése érdeké-

ben, továbbá a veszélyes anyagokat tartalmazó elektrolit eltávolítását is meg kell oldani. Az aprítás fő szerepe a legértékesebb anyagokat tartalmazó black mass feltárása (egyfajta szelektív szemcseméret csökkentés), annak érdekében, hogy az szemcseméret szerint leválasztásra tudjon kerülni.

## 6. GÉPJÁRMŰ ELEKTRONIKÁK

Egyre nagyobb számban találhatók elektronikai alkatrészek a gépkocsikban (szenzorok, érzékelők, Human-Machine-Interface (HMI), számítógép, fényforrások [8, 11], de ebbe a kategóriába sorolhatók a különböző mechatronikák is) a vásárlói igények (extra felszereltségek, és a törvényi szabályozások következtében). Számítógépből akár 50 darabos nagyságrend is előfordulhat a legkorszerűbb járművekben. Ezeket az alkatrészeket is célszerű lehet az előbontás során eltávolítani, egyrészt a jelentős bennük rejlő érték miatt (szerkezeti anyagok), másrészt használt alkatrészként történő értékesítés végett, megfelelő bevizsgálás után (ezen drága alkatrészekre nagy igény mutatkozhat a meghibásodásuk esetén, a gyári új alkatrészek magas ára miatt is). Mindezen megoldások maximális összhangban lennének a Green Deal-el és Circular Economy irányelvvvel.

A Miskolci Egyetemen is folynak kutatások ezen alkatrészek feldolgozhatóságát illetően, az Auto Mandy Car Kft-vel együttműködve. A vizsgálatokba bevontuk a gépkocsikban található számítógépeket, szenzorokat (pl. radar), valamint a hagyományos halogén ill. LED fényforrásokat (17-18. ábra, 3. táblázat) Tóth (2022) és Dojcsák (2021) és szerzőtársaik szerint. A vizsgálatok kiterjednek az alkatrészek felépítésének, és anyagi összetételének meghatározására, valamint a mechanikai előkészítés vizsgálatára.

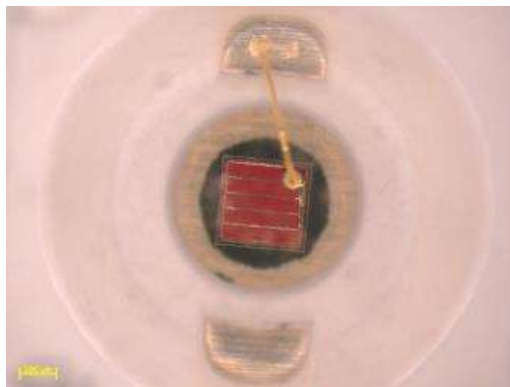


**17. ábra.**

*Vizsgálatokba bevont LED fényszóró (gyártó „A”), és a benne található LED-eket tartalmazó NyÁK (Forrás: Dojcsák, 2021)*

**3. táblázat.** Gépjármű LED fényszóró anyagi összetétele  
Gépjármű LED fényszóró anyagi összetétele (gyártó „A”)

Egység megnevezése	Tömeg, m [g]	Tömeghányad [%]
Optikai szálak	350,03	7,16
Csiszolt üvegek	381,53	7,81
Hűtő elemek (fém)	817,46	16,73
Csavarok	113,16	2,31
NyÁK	85,85	1,75
Műanyag alkotóelemek	2477,88	50,71
Alumínium hűtő lemez	12,70	0,26
Műanyag csatlakozók	60,00	1,23
Kábelek műanyag borítása	20,39	0,41
Kábelek réztartalma	63,72	1,30
Lámpabúra (első, PC)	504,00	10,33
<b>Összesen</b>	<b>4886,72</b>	<b>100,00</b>



**18. ábra.**

Gyártó „B” lámpatestében található LED chip (Forrás: Tóth, 2022)

Jó példa az értékes elemeket tartalmazó alkatrészekre a távolságtartó radar szenzor, melyben nyomtatott áramkör, és arany bevonatú csatlakozók találhatóak (19. ábra).



**19. ábra.**

*ACC radar szenzor összeszerelt állapotban (b), és szétszerelést követően (j) Forrás: Gyürek, 2021*

Az ACC-ben a csatlakozók tűin mértünk vékony aranybevonatot. Az részegységek tömegét, ill. aranytartalmát mutatja a 4. táblázat.

**4. táblázat.** ACC részegységek tömege és aranytartalma

Részegység	Tömeg, $m_i$ [g]	Aranytartalom, $c_i$ [g/t]
műanyag burkolatok	53,94	50,4
alumínium ház	107,89	
NyÁK lapok	35,89	81,3
Fém kapsok	8,80	
Összesen	206,52	27,3

A mechanikai előkészítés során röpitő törővel végeztük a szemcseméret csökkentést, ez kíméletesen, gyakorlatilag alkatrészekre bontotta az ACC-t. Ezt követően osztályozással, örvényáramú és mágneses szeparátorral különítettük el a részegységeket, ill. szerkezeti anyagokat (így az arany tartalmú csatlakozókat) [12].

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS, FŐBB KIHÍVÁSOK

E nyersanyagokból az értékes alkotó kinyerése három fázisból áll Csöke et. al. (2013) szerint: 1) az elhasznált készülékek szelektív begyűjtése, ami a nyersanyagforrást biztosítja; 2) a nyers elektronikai hulladék előkészítése – az értékes alkotók dús koncentrátumokba vitele- mechanikai és kémiai/biológiai eljárásokkal; 3) és végül a kapott koncentrátumokból kohászati úton a tiszta fémek kinyerése. Sok esetben azonban jelentős kihívásokkal szembesülünk, ill. szembesülnek a hulladékfeldolgozó cégek. A fent bemutatott példák esetében is látható, hogy azonos típusú eszközök, különböző anyagáramokban jelennek meg: az ACC elektroni-

kai hulladék típusú eszköz, ami a roncsautó anyagáramban jelenik meg, és azzal a technológiával az értékes részek nem, vagy csak rossz hatásokkal nyerhetők ki, ellenben a műanyag hányad, melléktermék aránya jelentős. Jelentős problémát jelentenek az értékes elemek rendkívül kis koncentrációi a hulladékokban (néhány g/t). E high tech eszközök összetett szerkezetek, sok esetben vékony rétegek, bevonatok formájában vannak jelen az értékes elemek, ami a mechanikai előkészítést, dúsítást követően további eljárásokat igényel. A különböző elemekből alkalmazott mennyiségek csökkennek a gyártási technológiák fejlődésével (több termék, kisebb koncentráció). Megnehezíti a tervezést a technológiaváltások, ill. az esetlegesen előforduló elem kiváltások (pl. Li-ion akkumulátor esetén számos kutatás irányul az értékes elemek kiváltására); valamint a kinyerni kívánt alkotók, elemek tőzsdei árának jelentős ingadozása.

A körforgásos gazdaság szellemében a fent leírt problémák enyhíthetők, azonban ehhez szükséges már a termékek bevezetésekor, gyártásakor kidolgozni a hulladékok begyűjtésének rendszerét, és feldolgozásának technológiáját.

#### **Köszönetnyilvánítás**

Szerzők köszönetüket fejezik ki a Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezet-tudományi Kar dolgozóinak, kiemelten Prof. Dr. habil Csőke Barnabásnak, korábbi kollégáinak, diplomázó hallgatóinak.

#### **Hivatkozások**

- [1.] Csőke, Barnabás; Faitli, József; Nagy, Sándor; Mádainé, Üveges Valéria; Magyar, Tamás: Kritikus elemek a másodnyersanyag-forrásokban, elektronikai hulladékokban: Critical elements in secondary raw material resources, in electronic wastes. *BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK-BÁNYÁSZAT* 146 : 5-6 pp. 48-57., 10 p. (2013)
- [2.] BOKÁNYI LJ., VARGA T., MÁDAI-ÜVEGES V., PAULOVIC S J.: Bioprocessing research in institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing. University of Miskolc, Proceedings of the 2nd International Conference on Biotechnology and Metals, pp. 5-8. (2011)
- [3.] Bokányi, L.; Hornyák, G.; Nagy, S.; Mádainé, Üveges V.: Li-ion akkumulátor bioszolubilizálásának vizsgálata A. ferrooxidans és A. ferridurans baktériummal. In: József, Faitli (szerk.) Proceedings of the Miskolc IPW- IV. Sustainable raw materials international project week Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Institute of Raw Material Preparation and Process Engineering, University of Miskolc (2020) Paper: B81, 7 p.
- [4.] Mádainé, Üveges Valéria; Bokányi, Ljudmilla: Fémek kinyerése elektronikai hulladékokból bioszolubilizációval. *BÁNYÁSZATI ÉS KOHÁSZATI LAPOK-KOHÁSZAT* 153 : 2020/4 pp. 35-41., 7 p. (2020)

- 
- [5.] CSÓKE B., BŐHM J., MÁRKUS ZS., FERENCZ K., TÖRÖK. E. (2008): Processing of Used Small Electronic Household Appliances. Proceedings of XXIV. International Mineral Processing Congress (ISBN: 978-7-03-022711-9), (Beijing). Vol. 3, pp. 3529-3539.
- [6.] Tarascon, JM., Armand, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature* 414, 359–367 (2001). <https://doi.org/10.1038/35104644>
- [7.] Orosz, Kinga Andrea ; Romenda, Roland Róbert ; Mádainé, Üveges Valéria ; Nagy, Sándor: Mobiltelefonokból származó lítium-ion akkumulátorok felépítésének és apríthatóságának vizsgálata In: Czupy, Imre (szerk.) III. RING – FENNTARTHATÓ NYERSANYAG-GAZDÁLKODÁS - III. SUSTAINABLE RAW MATERIALS KONFERENCIAKÖTET – PROCEEDINGS Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó (2019) 310 p. pp. 203-209., 7 p.
- [8.] Nagy, Sándor; Pólya, Imre; Zajzon, Norbert: Gallium in the light emission diodes: What leads a LED? In: Földessy, J (szerk.) Basic research of the strategic raw materials in Hungary. Miskolc, Magyarország : Milagrossa Kft. (2014) 159 p. pp. 96-100., 5 p.
- [9.] Pólya Imre Mátyás: LCD LED kijelzők háttérvilágításában található kritikus elemek dúsítása mechanikai úton. Diplomamunka 2015. ME, NyKE Intézet. Konzulens: Nagy Sándor
- [10.] Mádainé, Üveges V.; Bokányi, L.; Papp, R. Z.; Szamosi, Z.; Romenda, R. R.; Nagy, S.: VALUABLE ELEMENTS IN WASTE ELECTRICAL & ELECTRONIC EQUIPMENT (WEEE) AND THEIR POSSIBLE RECOVERY METHODS INTRODUCTION. GEOSCIENCES AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC 8 : 12 pp. 71-83., 13 p. (2020)
- [11.] S, Nagy; L, Bokányi; I, Gombkötő; T, Magyar: Recycling of Gallium from End-of-Life Light Emitting Diodes. ARCHIVES OF METALLURGY AND MATERIALS 62: 2 pp. 1161-1166., 6 p. (2017)
- [12.] Gyűrék Barbara: Investigation of mechanical processing options for end of life driving assistant systems in order to yield the valuable material components. Diplomamunka, Miskolci Egyetem, NyKE Intézet, 2021. Konzulensek: Nagy Sándor, Romenda Roland
- [13.] BUCHERT M., MANHART A., BLEHER D., PINGEL D. (2012): Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Commissioned by the North Rhine- Westphalia State Agency for Nature. Environment and Consumer Protection Darmstadt, 24.02.2012.

- [14.] Muhammad, Faisal Fadhil; Sándor, Nagy; Roland, Róbert Romenda; Richárd, Zoltán Papp: RECYCLING POSSIBILITY OF END OF LIFE SOLID STATE DRIVE (SSD). In: Gábor, Rákhely; Cecilia, Hodúr (szerk.) II. Sustainable Raw Materials Conference Book - International Project Week and Scientific Conference. Szeged, Magyarország: University of Szeged (2019) 312 p. pp. 10-18., 9 p.
- [15.] Csőke, Barnabás (szerk.); Bokányi, Ljudmilla (szerk.); Faitli, József (szerk.); Nagy, Sándor (szerk.) (2014): Elektronikai hulladékok előkészítése a stratégiai elemek visszanyerése érdekében. Miskolc, Magyarország: Milagrossa Kft., 155 p. ISBN: 9786158007320
- [16.] Tóth Lilla Ildikó (2022): Hulladékká vált LED tartalmú autó világítótestek vizsgálata. Szakdolgozat. Miskolci Egyetem, MFK, NyKE Intézet
- [17.] Órsi, Janka; Nagy, Sándor; Trinh, Van Quyen; Papp, Richárd Zoltán (2019): OLED kijelzők felépítésének és mechanikai előkészíthetőségének vizsgálata. In: Tibor, Kiss; Anita, Dolgosné Kovács; Csaba, Vér; Péter, Máthé (szerk.) Sustainable resource management: Scientific conference proceedings, Pécs, Magyarország : University of Pécs Faculty of Engineering and Information Technology 179 p. pp. 105-113., 9 p.
- [18.] Imre, Gombkötő; Sándor, Nagy; Lilla, Szutorcsik; Tamás, Magyar; Barnabás, Csőke; Zoltán, Eke; Péter, Chrabák; Zsolt, István; Pál, Lukács (2017): Dismantling and Recycling of End of Life Large Commercial Vehicles. In: Dominika, Behunová; Lucia, Ivaničová (szerk.) XX. International Conference on Waste Recycling, Košice, Szlovákia : Institute of Geotechnics SAS, pp. 5-8., 4 p.
- [19.] Tamás, Oláh; Sándor, Nagy; Barnabás, Csőke; Péter, Chrabák; Zsolt, István; Pál, Lukács (2019): MATERIAL BALANCE OF END OF LIFE BUSES, FOCUSING ON ELECTRIC AND ELECTRONIC PARTS. In: Gábor, Rákhely; Cecilia, Hodúr (szerk.) II. Sustainable Raw Materials Conference Book - International Project Week and Scientific Conference Szeged, Magyarország: University of Szeged 312 p. pp. 68-75., 8 p.
- [20.] Dojcsák Marcell (2021): Élettartamuk végére ért vasúti vontatójárművek feldolgozásának vizsgálata. Szakdolgozat. Miskolci Egyetem, MFK, NyKE Int.

*Webes hivatkozások*

- [Web1.] Cornelis P. Baldé, Ruediger Kuehr, Tales Yamamoto, Rosie McDonald, Elena D'Angelo, Shahana Althaf, Garam Bel, Otmar Deubzer, Elena Fernandez-Cubillo, Vanessa Forti, Vanessa Gray, Sunil Herat, Shunichi Honda, Giulia Iattoni, Deepali S. Khetriwal, Vittoria Luda di Cortemiglia, Yuliya Lobuntsova, Innocent Nnorom, Noémie Pralat, Michelle Wagner (2024). International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). 2024. Global E-waste Monitor 2024. Geneva/Bonn.
- [Web2.] <http://www.bayzoltan.hu/hu/korforgasos-gazdasag/>
- [Web3.] Európai Parlament (<https://www.europarl.europa.eu/portal/hu>): Körforgásos gazdaság: mit jelent, miért fontos és mi a haszna? Gazdaság. Frissítve: 2022.4.22. 14:24
- [Web4.] Document 52020DC0474; COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability; COM/2020/474 final
- [Web5.] Ian Tiseo: Global e-waste generation 2010-2019, (Oct 4, 2022), <https://www.statista.com/statistics/499891/projection-ewaste-generation-worldwide/>
- [Web6.] HOSZ, <https://www.hosz.org/korforgas>