

Szemcsés anyagok – csővezetékben – folyadékárammal való szállításának méretezése

2. rész: A nyomásvesztés számítása

FAITLI JÓZSEF ■ Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás technikai Intézet

■ ejtfaitj@uni-miskolc.hu

Érkezett: 2011. 04. 04. ■ Received: 04. 04. 2011. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.1>

Design of transport of particulate materials by fluid flow in pipelines

Part 2: Calculation of the pressure loss

Bulk state construction materials, such as sand, gravel and the mixed concrete can be transported in pipes by fluid flow. The most important technical parameter of a transport system is the pressure loss at the designed mixture flow rate. The pressure loss determines the energy need, therefore determines the operational costs. In the previous part the fine suspension – coarse mixture flow model and the two basic devices: the tube viscometer and the hydraulic test loop developed by the Institute of Raw Materials Preparation and Environmental Processing of the University of Miskolc were summarized. In this 2nd part the empirical and mathematical method of specifying the type of mixture flow, the pressure loss calculation method and an example are shown.

Bevezetés

A szemcsés állapotú építő anyagok, mint pl. a homok-kavics, vagy a bekevert beton szállíthatók csővezetékben folyadékáram segítségével. A szállítás legfontosabb paramétere a megválasztott keverékáramlási sebességhez tartozó nyomásvesztés, ami a szállítás energia igényét közvetlenül meghatározza. A dolgozat első részében (Építőanyag 2011/1-2) összefoglaltuk a Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás technikai Intézetében kidolgozott finom szuszpenzió – durva keverékáramlás modellt és a két alapvető kísérleti berendezést, a csőviszkózimétert és a hidraulikus szállítási mérőkört, amellyel vizsgálatokat kell végezni az adott anyaggal, konkrét méretezés esetén. A második részben a szilárd-folyadék csőáramlás jellegének a meghatározására szolgáló kísérleti és matematikai módszert, a nyomásvesztés számításának módját és egy mintapéldát mutatunk be.

A keverékáramlási jelleg meghatározása a nyomásvesztés görbe matematikai elemzése alapján

A korábbiakban ismertettem, hogy adott anyag esetén a finom szuszpenzió - durva keverékáramlás közötti határ szemcseméretet úgy kell meghatározni, hogy szűken osztályozott szemcsefrakciókból készített keverékek nyomásvesztés görbéit kell megmérni. A nyomásvesztés görbe alapján a következő módszer segítségével eldönthető a keverékáramlás jellege. Bevezetjük a következő mennyiséget, a ϕ járulékos veszteség számot, ami egy dimenzió nélküli szám, függ a keverékáramlási sebességtől és a vízhez képest a szemcsék okozta járulékos szállítási energia igény növekedéssel arányos :

$$\phi = \frac{\Delta p - \Delta p_v}{C_T \Delta p_v} \quad (5)$$

Dr. FAITLI József
(1965) egyetemi docens, a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás technikai Intézetének oktatója. 1989-ben a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen szerzett bányagépész- és villamos mérnök diplomát, amelyet követően az Eljárás technikai Tanszéken helyezkedett el és amelynek jelenleg is oktatója. Hosszabb külföldi tanulmányutakat (Louvain-la-neuve, Belgium, Tempus ösztöndíj, 7 hónap, 1991, Chicago, USA, Fulbright ösztöndíj, 12 hónap, 1993–94.) követően 1998-ban szerzett PhD oklevelet, mechanikai eljárás technika tudományterületen. Fő oktatási és kutatási területe a többfázisú áramlások, szemcsemozgás, mintavételezés, porleválasztás, stb... Tudományos publikációinak száma 75.

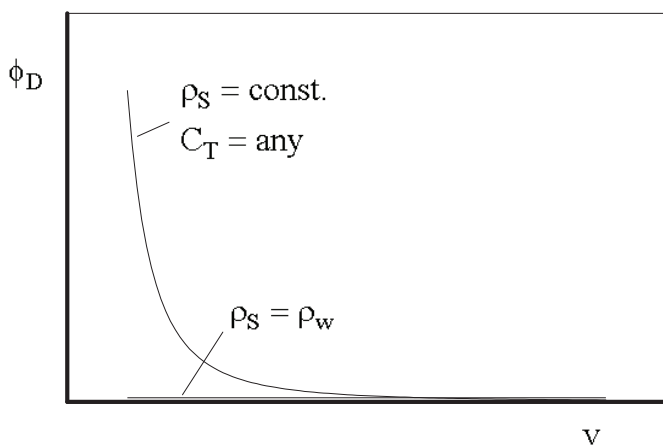
A tiszta víz nyomásvesztését (Δp_v), – minden mért pont esetén – azonos sebességhez kell kiszámítani. A szállítási koncentráció (C_T) a mérésből ismert, így a $\phi = f(v)$, függvénykapcsolat ábrázolható.

A durva keverékáramlás tipikus $\phi = f(v)$ függvénye

A durva keverékáramlásra vonatkozó, már hivatkozott Durand típusú összefüggések mindegyike [12] esetén a $\Delta p - \Delta p_v$ járulékos nyomásvesztés a szállítási koncentráció első hatványával arányos. Ez azt jelenti, hogy a ϕ járulékos nyomásvesztés szám nem függ a koncentrációtól, azaz adott anyag különböző koncentrációjú keverékeinek a $\phi = f(v)$ függvénye azonos görbére esik és ez a görbe hiperbolikus alakú, és ϕ a sebesség növekedésével 0-hoz tart. A függvény alakja és egy mért példa látható a 11. ábrán.

Itt egy konkrét mérés eredményeit is ábrázoltam az elméleti függvényalak mellett, ahol jellemzően 0,9 mm-es szemcseméretű erőműi salakból készített durva keverékek különböző koncentrációjú (17–42% tartományban), mért $\phi = f(v)$ értékei láthatók. A mért pontok jó közelítéssel egy görbére esnek. Habár nincs ipari jelentősége, de szélső értéként vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor a szállított szilárd anyag sűrűsége megegyezik a vízéval ($\rho_s = \rho_v$). Ilyenkor a durva keverékáramlás ϕ értéke minden sebességhez 0. A finom szuszpenzióáramlás esetén ez nem így van és ez lényeges különbség. A módosított Durand egyenlet rendezése után adódik a következő összefüggés, amelyből jól látszik a $\phi = f(v)$ függvénykapcsolat hiperbolikus jellege. Az n és K anyagtól függő paramétereket ennek a függvénynek a mért adatokra való illesztésével határozhatjuk meg.

$$\phi = \frac{1}{C_E^{0,75}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_v} - 1 \right)^{1,5} K \left(\frac{\sqrt{gD}}{v} \right)^n \quad (6)$$



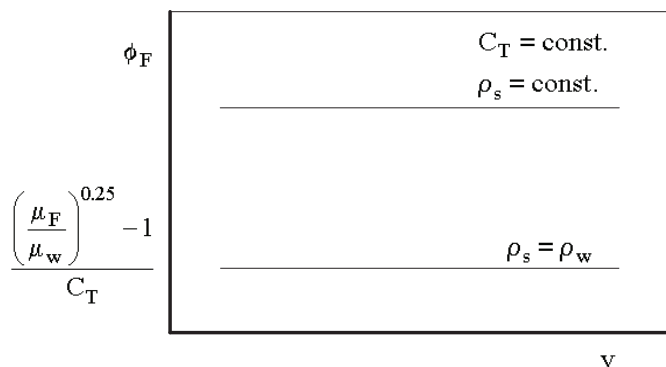
Vizsgált anyag: Mátrai Erőművi salak, 2243 kg/m³ szemcsesűrűség, 0,9 mm 80%-os szemcseméret, 53 mm-es csőátmérő.

11. ábra A durva keverékáramlás $\phi = f(v)$ függvénye
Fig. 11. The $\phi = f(v)$ function of coarse mixture flow

A finom szuszpenzióáramlás tipikus $\phi = f(v)$ függvénye

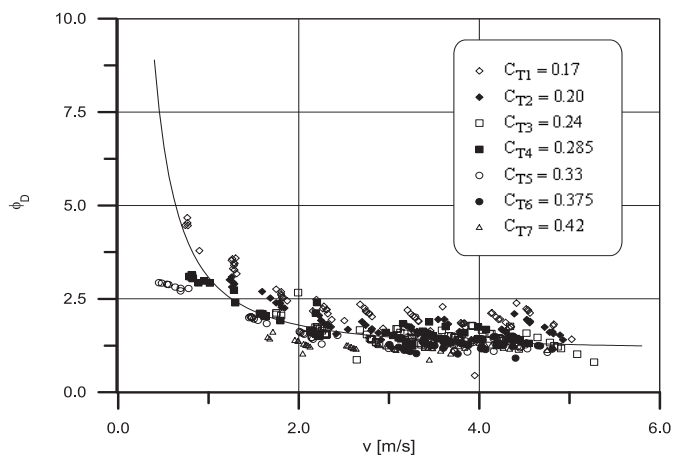
Finom szuszpenzióáramlásban a nagyon kisméretű szemcsék a lamináris határretegbe kerülve megváltoztatják az áramló közeg folyási viselkedését. Nagyszámú mérést végeztünk cső- és rotációs viszkoziméterben finom szemcsés anyagokból készített szuszpenziókkal. Általánosságban megállapítható, hogy finom szemcséket keverve a vízhez az így keletkező finom szuszpenzió viszkozitása a koncentráció növekedésével elkezd nőni. Egészen 20 tf% koncentrációig a folyási jelleg általában nem változik meg, a szuszpenzió is Newtoni viselkedésű, az abszolút viszkozitás kismértékben, – közel lineárisan – növekszik. Jellemzően 20 tf% koncentráció felett a folyási jelleg megváltozik, pl. a pernyék minden mért esetben Bingham – plasztikusá válnak – nem-Newtoni lesz és a szuszpenzió belső súrlódása, azaz a viszkozitás (merevségi tényező, konzisztencia index a folyási modelltől függően) exponenciálisan megnő [11].

A finom szuszpenzióáramlás $\phi = f(v)$ függvényét, elméleti úton akkor tudjuk egyszerűen meghatározni, ha a finom szuszpenzió



Vizsgált anyag: Fehérvárcsurgói üveghomok, $x_{80} = 25 \mu\text{m}$, $\rho_s = 2644 \text{ kg/m}^3$, csőátmérő $D = 16 \text{ mm}$.

12. ábra A finom szuszpenzióáramlás $\phi = f(v)$ függvénye
Fig. 12. The $\phi = f(v)$ function of fine suspension flow



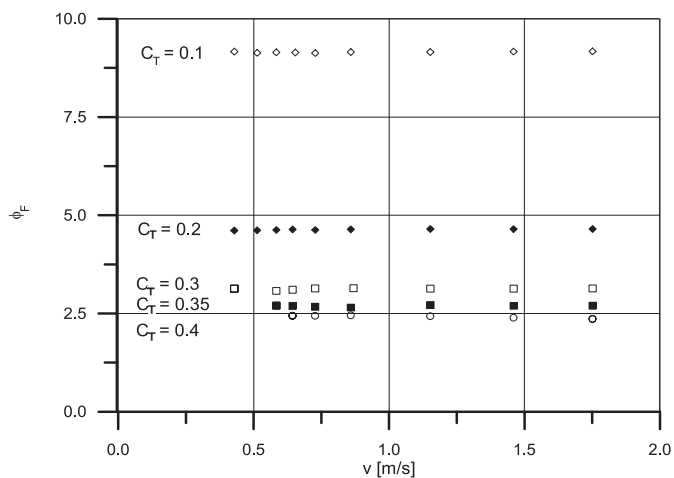
Newtoni folyási viselkedésű és a csőáramlásra jellemző Reynolds szám a $Re = 2300 \dots 100\,000$ tartományba esik. Ez a legfontosabb tartomány az ipari alkalmazás szempontjából, mivel a sűrű zagyos ($C_T \approx 35 \text{ tf} \%$) pernye – salakszállító csővezetékben a finom szemcsék arányának megfelelően a hordozó finom szuszpenzióáramlás koncentrációja kisebb 20 tf%-nál, ez a közeg még Newtoni folyadék. Ezen a Reynolds szám tartományon, Newtoni folyadékokra a Blasius egyenlet segítségével számíthatjuk az (f) Fanning féle csősúrlódási tényezőt.

$$f = \frac{0.0791}{Re^{0.25}} \quad (7)$$

A Blasius egyenlet segítségével kifejezhetjük a finom szemcsék jelenléte miatti ϕ járulékos veszteség számot:

$$\phi_F = \frac{\Delta p_F - \Delta p_v}{C_T \Delta p_v} = \frac{\left(1 + C_T \frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_v}\right)^{0.25} \left(\frac{\mu_F}{\mu_v}\right)^{0.25} - 1}{C_T} \quad (8)$$

Az összefüggésből jól látszik, hogy a leszűkített tartományon a finom szuszpenzióáramlás $\phi = f(v)$ függvénye vízszintes



egyenes, mivel ϕ nem függ a v -től. Az egyenes függőleges pozíciója attól függ, hogy a szemcsék miatt a finom szuszpenzió viszkozitása (μ_p) mennyire nő meg. Ha a szemcsék sűrűsége megegyezik a vízzel (határeset), a viszkozitás várhatóan akkor is megnő, ϕ nem 0, szemben a durva keverékáramlással. A 12. ábrán a függvény elméleti alakja és egy mért példa látható.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a $\phi = f(v)$ függvény alkalmas a monodiszperz szemcséket tartalmazó szilárd-folyadék keverékek csőáramlásának a minősítésére. Ha ez a függvény hiperbolikus jellegű és nagy sebességek esetén 0-hoz tart, a csőben durva keverékáramlás, ha a függvény vízszintes egyenes (elméleti úton csak a megadott tartományon vizsgál-tam), akkor finom szuszpenzióáramlás valósul meg a csőben.

A finom szuszpenzióáramlás nyomásvesztésének számítása

Tiszta folyadékok és a finom szuszpenzióáramlás esetén, az adott csőhosszra eső nyomásvesztéséget a közeg reológia-ja alapján lehet számítani. Az eddigi ipari munkáim során, a következő négy folyási modell valamelyikével jellemezhető anyagokkal találkoztam, szerencsére a vizsgált anyagok nem mutattak viszkoelasztikus és időben jelentősen változó tulajdonságokat.

Folyási modell neve	Anyagegyenlet	Folyási paraméterek
Newtoni	$\tau = \mu \left(\frac{du}{dr} \right)$	μ - abszolút viszkozitás
Bingham - plasztikus	$\tau = \tau_o + \eta \left(\frac{du}{dr} \right)$	τ_o - nyugalmi határfeszültség η - merevségi tényező
Hatványfüggvénnyel jellemezhető $n > 1$ - pszeudoplasztikus, $n < 1$ - dilatáló	$\tau = K \left(\frac{du}{dr} \right)^m$	K - konzisztencia index m - hatványkitevő
Reáplasztikus	$\tau = \tau_o + K \left(\frac{du}{dr} \right)^m$	τ_o - nyugalmi határfeszültség K - konzisztencia index m - hatványkitevő

A PhD értekezésemben részletesen foglalkoztam a különféle reológiai modellek esetén a nyomásvesztés számításával, amelyeket a RHEOLOGY programba be is programoztam. A program segítségével a felírt folyási modellek esetén újra számoltam a csősúrlódási diagrammokat (pl. Moody diagram). Azért, hogy a dolgozat kerek egész legyen, röviden foglaljuk össze azt, amire az ipari gyakorlatban szükség van. A legbonyolultabb folyási modell a reáplasztikus, amely három folyási paramétert tartalmaz és a felírt modellek lefelé visszaegyszerűsíthetők. Ha a reáplasztikus modellben pl. az $m = 1$, akkor a modell visszaegyszerűsödik a Bingham folyásra, természetesen ekkor a K helyett célszerű az η merevségi tényező megnevezés. Ha a Bingham folyásban eltűnik a τ_o nyugalmi határfeszültség, vissza jutottunk a Newtoni folyadékokhoz és ekkor az η helyett μ -vel jelöljük és viszkozitásnak nevezzük a jellemző folyási paramétert. A nyomásvesztés számítására két módszer alkalmazása elegendő. Newtoni folyadékok esetén célszerű a klasszikus áramlásban alapján számítani a nyomásvesztés-

get, míg nem-Newtoni folyadékok esetén a Hanks módszer [5] – általam bevezetett – iterációs megoldását alkalmazhatjuk mind a három reológiai modell esetén. A következőkben nem jelölöm az F (finom szuszpenzióáramlás) indexet, de a korábbiakból következik, hogy a tiszta folyadék, vagy a monodiszperz finom szuszpenzióáramlás vagy a széles mérettartományú polidiszperz esetben a hordozó finom szuszpenzióáramlás esetén is ugyanígy kell számítani, csak az adott anyag fizikai paramétereit kell alkalmazni. A Darcy és Weisbach [6] egyenletből számíthatjuk a nyomásvesztéséget.

$$\Delta p = 2f \frac{v^2 \rho}{D} \tag{9}$$

Az egyenletben az f Fanning féle csősúrlódási tényező szerepel, a feladat ennek a meghatározása a reológiai paraméterek és az áramlás jellege (lamináris-turbulens) alapján. Newtoni közegek esetén az áramlás jellegének az eldöntésére először a Reynolds számot kell kiszámítani:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu}$$

ha a Reynolds szám kisebb, mint 2320, akkor az áramlás lamináris a csősúrlódási tényező pedig:

$$f = \frac{16}{Re}$$

Ha a Reynolds szám nagyobb, mint, 2320 az áramlás turbulens, akkor a Colebrook egyenlet használható a teljes csőerdesség és Reynolds szám tartományon.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \frac{D}{2k} + 3.48 - 4 \log \left(1 + 9.35 \frac{D}{2k Re \sqrt{f}} \right) \tag{10}$$

A nyomásvesztés számítása nem-Newtoni közegek esetén

A számítást célszerű Hanks módszerének iterációs megoldásával elvégezni. A módszer reáplasztikus folyadékokra érvényes, azonban $m = 1$ behelyettesítéssel Bingham – plasztikus és $\tau_o = 0$ behelyettesítéssel hatványfüggvényes folyásra is alkalmazhatjuk. Ha $m = 1$ és $\tau_o = 0$ egyidejű behelyettesítésével végezzük a számítást, nagy pontossággal visszkapjuk a korábban ismertetett klasszikus áramlásban – Newtoni folyadékokra – vonatkozó értékeit. A PhD értekezésben elvégzett nagyszámú számítással ezeket ellenőriztem. Első lépésben az áramlásra jellemző két dimenzió nélküli számot kell kiszámítani, amelyek a három folyási paraméter miatt lényegesen bonyolultabbak:

Reynolds szám:

$$Re_{PL} = 8 \left(\frac{m}{1+3m} \right)^m \left(\frac{D}{2} \right)^m v^{2-m} \rho \frac{1}{K} \tag{11}$$

Hedström szám:

$$He_m = \frac{D^2 \rho}{\tau_o} \left(\frac{\tau_o}{K} \right)^{\frac{2}{m}} \tag{12}$$

Hasonlóképp a Newtoni folyadékokhoz, ez esetben is a lamináris-turbulens átmenethez tartozó – határ-dimenzió nélküli számot kell kiszámítani, hogy el tudjuk dönteni a vizsgált

csőben milyen az áramlás, mivel itt is teljesen más a számítás módja a két esetben. A „hatványfüggvényes” Reynolds szám lamináris-turbulens határértéke a következő egyenletből számítható:

$$(Re_{PL})_C = \frac{6464m}{(1+3m)^m} (2+m)^{\frac{2+m}{1+m}} \frac{\left[\frac{(1-x_{0C})^2}{1+3m} + \frac{2x_{0C}(1-x_{0C})}{1+2m} + \frac{x_{0C}^2}{1+m} \right]^{2-m}}{(1-x_{0C})^m} \quad (13)$$

x_{0C} a nem nyírt dugó (a csőáramlás belső része, ahol a feszültség kisebb, mint a nyugalmi határfeszültség ezért itt nem mozdulnak el a folyadék rétegek egymáshoz képest, kialakul a dugó), dimenzió nélküli sugara és ennek az átmenetben érvényes értéke x_{0C} , amelyet a következő egyenletből kell iterációval kiszámítani, a Hedström szám és a reológiai paraméterek alapján.

$$He_m = \frac{3232}{m} (2+m)^{\frac{2+m}{1+m}} \left[\frac{x_{0C}}{(1-x_{0C})^{1+m}} \right]^m \left(\frac{1}{1-x_{0C}} \right)^m \quad (14)$$

Ha $Re_{PL} < (Re_{PL})_C$ az áramlás lamináris, ha nagyobb turbulens. Lamináris tartományon először x_{0C} -t kell kiszámítani a következő két egyenletből iterációval. Nem fejezhető ki egyszerűbben a két egyenlet, ráadásul egy számítási segéd mennyiséget ψ -t is használni kell. Két egyenlet, két ismeretlen:

$$Re_{PL} = 2He_m \left(\frac{m}{1+3m} \right)^2 \left(\frac{\psi}{x_0} \right)^{\frac{2-m}{m}} \quad (15)$$

$$\psi = (1+3m)^m (1-x_0)^{1+m} \left[\frac{(1-x_0)^2}{1+3m} + \frac{2x_0(1-x_0)}{1+2m} + \frac{x_0^2}{1+m} \right]^m \quad (16)$$

Ha ψ ismert, akkor a csősúrlódási tényező már egyszerűen számítható a lamináris tartományon:

$$f = \frac{16}{\psi Re_{PL}} \quad (17)$$

Reálpasztikus folyadékok, simafalú csőben való, turbulens áramlásának az energia igényét, azaz a nyomásvesztésnek a számítására Hanks a Prandtl-Van Driest féle keveredési hossz turbulencia hipotézis alapján dolgozta ki a számításra alkalmas módszert. A módszer alapján nem lehet közvetlenül a nyomásvesztést kiszámítani adott sebességhez, hanem az R reálpasztikus turbulencia paraméter változtatásával, azaz $R = R_C$ értékről (R_C a lamináris-turbulens átmenetben érvényes turbulencia paraméter) kiindulva R értékét fokozatosan növelve, minden egyes értékhez ki lehet számítani az f Fanning csősúrlódási tényezőt, azaz először a csősúrlódási tényező diagramot kell meghatározni. Abból a hagyományos módon a Reynolds és Hedström szám alapján – f -et leolvastva – lehet a nyomásvesztést adott sebességhez kiszámítani. A RHEOLOGY programban a Hanks módszert a következő iterációs algoritmusba helyeztem, amellyel adott sebességhez közvetlenül ki tudjuk számítani a nyomásvesztést. Iterálásra

az intervallum felezéses módszert alkalmaztam. Első iterációs lépésként az alsó iterációs határ $R = R_C$, a felső iterációs határ egy nagy szám, célszerűen $R = 10^{15}$ és a közép érték a kettő átlaga. A cél az, hogy megtaláljuk azt az értéket, amikor $Re_{PL} - R_{PL,iteráció} < \epsilon$, azaz az eltérés kisebb, mint az iterációs pontosság. Mindig annak az intervallumnak a felére kell léptetni az iterációs R paramétert, ahol a szélső és középső értékhez az eltérés ($Re_{PL} - R_{PL,iteráció}$) előjele azonos. Az iteráció előtt célszerű R_C -t és B -t kiszámítani az alábbi egyenletekből.

$$R_C = \left(\frac{1+3m}{m} \right) \left[(Re_{PL})_C \left(\frac{f_C}{16} \right)^{\frac{2-m}{m}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad f_C = \frac{16}{\psi (Re_{PL})_C} \quad (18)$$

B kísérleti paraméter, amely a csőfalnak a keveredési úthosszra gyakorolt hatását veszi figyelembe. B -t a következő empirikus egyenletből számíthatjuk ki.

$$B = \frac{22}{m} \left[1 + \frac{0.00352 He_m}{(1+0.000504 He_m)^2} \right] \quad (19)$$

Az iteráció folyamán a korábbiakban leírt módszer szerint felvesszük R értékét. Az adott R értékhez a számítás menete az alábbi. A következő egyenletekből kiszámíthatjuk x_0 -t, majd $\Phi - t$.

$$R^2 = \frac{2He_m}{\frac{2-m}{x_0^m}} \quad (20)$$

$$\Phi = \frac{R - R_C}{\sqrt{8B}} \quad (21)$$

A dimenzió nélküli reálpasztikus folyási egyenlet a következőképp írható fel (22. egyenlet). A folyási egyenletben jól felismerhetők az egyes részek, az első a nyugalmi határfeszültséget, a második a viszkózus folyást, míg a harmadik a turbulencia hatását írja le. $\zeta(x, x_0, R)$ a dimenzió nélküli nyírási sebesség (a sebesség gradiens osztva a fal menti sebesség gradiens értékkel). Sajnos ζ nem fejezhető ki ebből az implicit egyenletből, adott x értékhez ζ -t iterációval kell meghatározni. x a dimenzió nélküli radiális koordináta ($x = 2r/D$), értéke a cső középvonalánál 0, a belső nem nyírt dugó szélén x_0 , a cső falánál pedig 1.

$$x = x_0 + (1-x_0) \zeta^m + \frac{2L}{8D} R^2 (1-x_0)^2 \zeta^2 \quad (22)$$

L a módosított – reálpasztikus – turbulens keveredési úthossz.

$$L = 0.36 \frac{D}{2} (1-x) \{ 1 - \exp[-\Phi(1-x)] \} \quad (23)$$

A térfogatáramot a sebességprofil integrálása alapján lehet meghatározni, ez Hanks modelljében is megfigyelhető, bár a dimenzió nélküli mennyiségek használata miatt nehezen. Az integrálást a dugó szélétől a csőfalig kell elvégezni ($x_0 \dots 1$). Az integrál tényleges kiszámításánál az okoz nehézséget, hogy az

integrálban szerepel a ζ , amit nem tudunk explicit kifejezni, csak iterációval kiszámítani. A megoldás a numerikus integrálás, azaz az $(x_0 \dots 1)$ tartományt felbontjuk N részre és minden x_i értékhez kiszámítjuk az $x^2\zeta$ függvényt, majd az integrál, vagyis a függvény alatti terület – nagy pontossággal – nem más, mint az így kapott téglalapok összege.

$$Re_{PLiteráció} = (1 - x_0)^{\frac{2-m}{m}} \left(\frac{m}{1+3m} \right)^m R^2 \left[\int_{x_0}^1 x^2 \zeta(x, x_0, R) dx \right]^{2-m} \quad (24)$$

Az adott iterációs lépésben felvettük R értékét, amelyhez most kiszámítottunk egy $Re_{PLiteráció}$ értéket, ami ha az iterációs pontosságon belül megegyezik az ismert Re_{PL} értékkel, akkor megvan a megoldás. A megtalált R érték alapján már ki tudjuk a csősúrlódási tényezőt, azaz valójában a nyomásvesztéséget számítani a következő összefüggésből.

$$R = \left(\frac{1+3m}{m} \right) \left[Re_{PL} \left(\frac{f}{16} \right)^{\frac{2-m}{m}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (25)$$

A durva keverékáramlás nyomásvesztésének számítása

A durva keverékáramlás nyomásvesztését a módosított Durand egyenletből számíthatjuk. Ha a szemcsés anyag monodiszperz, akkor abból egy szemcse, ha polidiszperz, de a határszemcsénél kisebb szemcséket nem tartalmaz, akkor a 80%-os szemcse alapján kell a süllyedési végsebességet és az ellenállástényezőt kiszámítani, úgy, hogy ez az egy szemcse a vízben süllyed. Ha a polidiszperz szemcsehalmaz finom szemcséket is tartalmaz, akkor a határszemcseméretnél nagyobb durva frakció 80%-os szemcséje a jellemző szemcse és az ellenállástényezőt úgy kell kiszámítani, mintha ez az egy szemcse süllyedne a finom szuszpenzióban. Megjegyezzük, hogy az n és K anyagtól függő paramétereket a félüzemi mérésekből is ezekhez a jellemző szemcsékhez kell meghatározni. A módosított Durand egyenletet erre a durva keverékáramlás a finom szuszpenzióáramlásban esetre írjuk fel, azaz az F finom szuszpenzióáramlás indexet használjuk a megfelelő helyeken a v víz, vagy f folyadék helyett.

$$\Delta p = \Delta p_F \left[1 + C_{TD} \frac{K \left(\frac{\rho_S}{\rho_F} - 1 \right)^{1.5}}{C_E^{0.75}} \left(\frac{\sqrt{gD}}{v} \right)^n \right] \quad (26)$$

Mintapélda

A modell alkalmazásának a bemutatására elvégeztem egy számítást, amelyhez a szükséges adatokat egyszerűen felvesszük. A feladat legyen egy 1:1 tömegarányú homokvíz keverék, 100 mm átmérőjű és 100 m hosszú vízszintes csővezetékben megvalósuló hidraulikus szállítás nyomásvesztésének a kiszámítása. Tételizzük fel, hogy a vett mintán elvégeztük a fizikai anyagvizsgálatokat és megállapítottuk, hogy a homok szemcsesűrűsége $\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3$ (piknométeres méréssel), 30

tömeg%-ban tartalmaz 50 μm -nél finomabb szemcséket és az ennél nagyobb durva frakció 80%-os szemcsemérete $x_{D80} = 1,9 \text{ mm}$ (a kézi szítással kapott empirikus eloszlás függvény alapján). Megjegyezzük, hogy a példában a finom szemcsék is 2600 kg/m^3 sűrűségű homok szemcsék. Iszapokra is alkalmazható a modell, természetesen a megfelelő tulajdonságok figyelembe vételével. A megadott tömeg koncentrációt számítsuk át térfogati koncentrációra. Az 1:1 tömegarány, 0,278:1 térfogataránynak felel meg, a szállítási térfogati koncentráció $C_T = 27,8\%$. A finom szuszpenzió-durva keverékáramlás modell szerint két részre kell a szilárd anyagot bontani, a határ szemcseméretnél – ami homokra 50 μm – kisebb és nagyobb, finom – ill. durva frakcióra. Vegyünk 1 liter mennyiséget ebből a keverékből és – a megadott adatok alapján – adódik, hogy az 1 liter keverék megoszlása a következő: 0,722 liter víz, 0,0834 liter finom szemcsefrakció és 0,1946 liter durva szemcsefrakció. Ebből a finom szuszpenzióáramlás szállítási térfogati koncentrációja $C_{TF} = 10,4\%$, ami $C_{TD} = 19,46\%$ szállítási térfogati koncentrációjú durva szilárd anyagot szállít. Ahhoz, hogy a tényleges számítást el tudjuk kezdeni, – az adott anyagokra – ismernünk kell egyrészt a finom szuszpenzióáramlás reológiáját, amit célszerű a csőviszkóziméterben, kb. 100 l mintán megmérni. Vagy esetleg rotációs viszkoziméterben 50 ml mintán, de azt inkább csak ellenőrzés céljára szoktuk elvégezni. Másrészt ismernünk kell az n és K durva keverékáramlási paramétereket, amelyeket a nagy hidraulikus mérőkörön lehet kb. 400 l mintán megmérni. Legyen a $C_{TF} = 10,4\%$ koncentrációjú finom szuszpenzió Newtoni reológiájú, és az abszolút viszkozitás $\mu_F = 26 \text{ mPas}$. K legyen 81, n pedig 3, ahogy homokokra Durand eredetileg meghatározta. A szemcsesűrűség és a koncentráció alapján a finom szuszpenzió sűrűsége $\rho_F = 1166 \text{ kg/m}^3$.

Válasszuk meg az áramlás zagysebességét. Konkrét méretezésnél ez alapvető fontosságú, mivel a durva keverékáramlás nyomásvesztés-görbe minimum pontjánál van az energetikai minimum, de egyúttal ez már veszélyesen kis sebesség a lerakódás szempontjából. A zagy sebessége legyen $v = 3 \text{ m/s}$, ami elég nagy, de például hidraulikus mederkotrásoknál még nagyobbat is alkalmaznak a nagyobb kapacitás miatt. A finom szuszpenzió Newtoni folyási viselkedésű ezért a klasszikus áramlástan alapján számíthatunk, a Reynolds szám $Re = 13453$, az áramlás turbulens, a Fanning csősúrlódási tényező $f = 0,0072$, amelyet a 10. Colebrook egyenletből számítottunk iterációval, $k = 0$, azaz sima falú cső behelyettesítéssel. Acél csövekben a homok lecsiszolja a csövet, a simafalú csőnek van a legnagyobb ipari jelentősége. A finom szuszpenzióáramlás nyomásvesztésége a 9. Darcy egyenletből: $\Delta p_F = 1,5 \text{ bar} / 100 \text{ m}$. Ellenőrzés céljából elvégeztük ugyanezt a számítást a RHEOLOGY programmal a közölt Hanks módszer iterációs megoldásával is, $m = 1$ és $\tau_0 = 0$ behelyettesítésével azonos paraméterekre. A Hedström szám természetesen $He_B = 0$, mivel $\tau_0 = 0$, a lamináris-turbulens határ plasztikus Reynolds szám $(Re_{PL})_C = 2100$. Európában 2320 az elterjedt lamináris-turbulens átmeneti Reynolds szám Newtoni folyadékokra, viszont az USA-ban ugyanez 2100. Az iterációval megkeresett turbulencia paraméter $R = 1152$, a Reynolds szám $Re_{PL} = 13453$, a Fanning csősúrlódási tényező $f = 0,0072$, azaz a Hanks módszer által kapott eredmények pontosan megegyeznek a Newtoni folyadékokra vonatkozó számítás eredményeivel.

Mielőtt a durva keverékáramlás nyomásvesztését kiszámítanánk meg kell határoznunk az x_{D80} szemcse közegellenállási tényezőjét. Az $x_{D80} = 1,9$ mm méretű és $\rho_s = 2600$ kg/m³ sűrűségű szemcse, $\mu_F = 26$ mPas viszkozitású és $\rho_F = 1166$ kg/m³ sűrűségű Newtoni folyadékban sülyyed a gravitációs erőter hatására. A sülyyedési végsebesség kiszámítása alapvető fontosságú a mechanikai eljárás technikában, Newtoni közegek esetére a számítás módja megtalálható a szakirodalomban [6]. A kiszámított szemcse körüli áramlást jellemző Reynolds szám $Re_x = 6,55$ azaz a szemcse körül a lamináris határregeken kívül az áramlás átmeneti lamináris-turbulens, – ez az átmeneti tartomány – a sülyyedési végsebesség $v_0 = 0,076$ m/s és az ellenállástényező $C_E = 5,18$. A teljes nyomásvesztés egy 26. módosított Durand egyenlettel számíthatjuk: $\Delta p = 1,84$ bar / 100 m.

Jelölések

A	- csőkeresztmetszet
B	- empirikus konstans a turbulens keveredési úthossz modellben
C_E	- szemcse körüli áramlásra jellemző ellenállástényező
C_T	- szállítási térfogati koncentráció
C_u	- helyi térfogati koncentráció
D	- a cső belső átmérője
(-du/dr)	- a nyírás sebesség gradiense
f	- Fanning csőszűrlődési tényező
g	- gravitációs gyorsulás
H	- magasság
He_m	- reálpasztikus folyadékok Hedström száma,
K	- konzisztencia index, hatványfüggvényes folyadékok reológiai paramétere
K	- a durva keverékáramlásra jellemző anyagi paraméter
k	- csőerdesség (egyenértékű a monodiszperz homok szemcseméretével, ami hasonló áramlási ellenállást fejt ki a csőben, Nikuradze kísérlet)
L	- keveredési úthossz a turbulencia modellben
m	- hatványkitevő, hatványfüggvényes folyadékok reológiai paramétere
Δp	- áramlási nyomásvesztés
r	- csőszűrlődési együttható
R	- reálpasztikus turbulencia paraméter
Re	- Reynolds szám
Re_{PL}	- reálpasztikus Reynolds szám
v	- keresztmetszeti átlagsebesség
x	- dimenzió nélküli sugár koordináta, $2r/D$
x_0	- dimenzió nélküli nem nyírt dugó koordináta, τ_0/τ_w
η	- Bingham folyadékok merevségi tényezője
ζ	- dimenzió nélküli nyírás sebesség gradiens
μ	- Newtoni folyadékok abszolút viszkozitása
ρ	- sűrűség
τ	- nyíró feszültség
τ_0	- Bingham folyadékok nyugalmi határfeszültsége
ϕ	- a szemcsék miatti járulékos áramlási veszteség szám
Φ	- reálpasztikus turbulencia paraméter
Ψ	- reálpasztikus folyadékok lamináris áramlási függvénye

Indexek

f	- folyadék
v	- víz
s	- szemcse
-	- szuszpenzió vagy zagy (a teljes anyagrendszer)
F	- finom szuszpenzió áramlás
D	- durva keverékáramlás
C	- a lamináris – turbulens átmenetben érvényes érték
w	- a fal menti érték

Felhasznált irodalom

- [1] Böhm J. – Debreczeni Á. – Fajtli J. – Gombkötő I. – Meggyes T.: *High-concentration hydraulic transport of tailings*. In Land Contamination and Reclamation, Vol.15 Num. 2; p. 195 - 217, ISSN:0967-0513, 2007.
- [2] Gombkötő I. – Fajtli L.: *Application of paste technology for tailings handling*. In Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress, p. 3522 – 3529, XXIV International Mineral Processing Congress, Beijing 2008, ISBN: 978-7-900249-54-8/TD.1, 2008.
- [3] Govier, G. W. – Aziz, K.: *The flow of complex mixtures in pipes*. Van Nostrand Reinhold, 1972.
- [4] Durand R. - Condolios E.: *Deuxième Journée de l'hydraulique*. Soc. Hyd. de France, Grenoble. 1952.
- [5] Hanks R.W.: *Low Reynolds number turbulent pipeline flow of pseudohomogeneous slurries*. Hydrotransport 5, Hannover BHRA Fluid Engineering. 1978.
- [6] Tarján I.: *A mechanikai eljárás technika alapjai*. Miskolci Egyetemi Kiadó. 2006.
- [7] Tarján I. - Debreczeni E.: *A hidraulikus szállítás és hidromechanizáció vizsgálata és bányászati alkalmazása* (Examination of the hydraulic transport and hydromechanization and applications in mining) Doctoral Thesis Miskolc. 1989.
- [8] Tarján, I. – Fajtli, J.: *The Measurement of the Transport Concentration of Suspension Flows by Pressure Measurements on Vertical Pipes*. Mineral Economy Journal (Gospodarka Surowceni Mineralnymi) Tom 11 - Zeszyt 4, pp. 467-478. 1995.
- [9] Tarján I. – Fajtli J.: *The Distinction of the Fine Suspension Flow from the Coarse Mixture Flow by Measuring of the Pressure Loss on a Horizontal Pipe*. Mineral Economy Journal (Gospodarka Surowceni Mineralnymi) Volume 14 - Number 3, page 61-71. 1998.
- [10] Wasp, E. J. – Kenny, J. P. – Gandhi, R. L.: *Solid-liquid flow Slurry Pipeline Transportation*. Trans. Techn. Publications, Clausthal, 1977.
- [11] Fajtli J. – Gombkötő I.: *Flow Properties of Fine Suspensions at High Concentrations*. microCAD 2005, International Scientific Conference, Miskolc. 2005.
- [12] Fajtli J.: *Calculation Process for the Determination of Head Loss of Steady-state Solid Liquid Mixtures Flow in Horizontal Pipelines*. Ph.D. értekezés, Miskolc, pp.1-148. 1998.
- [13] Fajtli J.: *Pressure Loss Calculation Model for Well-Graded Solid-Liquid Pipe Flows on the Basis of Systematic Pilot Plant Investigations*. Intellectual Service for Oil and Gas Industry: Analysis, Solution, Perspectives Co-Proceedings of Ufa State Petroleum Technical University and University of Miskolc, Ufa. 2000.
- [14] *Mátrai Erőműi salak – pernyék csővezetéki szállításának kísérleti vizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmányok. 1996. 1997. 1998.
- [15] *Astech pernyeminta reológiai vizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmány. 2009.
- [16] *Török pernyeminta fizikai anyagvizsgálata*. Műszaki szakértői tanulmány. Miskolc. 2011.

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.1>

Fajtli József: Szemcsés anyagok – csővezetékben – folyadékárammal való szállításának méretezése. 2. rész: A nyomásvesztés számítása. Építőanyag, 64. évf. 1-2. szám (2012), 2-7. p.

Készülékfejlesztés a hidrociklonozásban

NÉMETH JENŐ • Pannon Egyetem (Veszprém), Gépészmérnöki Intézet

VERDES SÁNDOR • Pannon Egyetem (Veszprém), Gépészmérnöki Intézet • verdess@almos.vein.hu

Érkezett: 2011. 10. 26. • Received – 26. 10. 2011. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.2>

Development in hydrocyclone-construction

In the paper the authors give an overview of the present situation of hydrocycloning and the tendencies in development in the field of both solid-liquid systems (suspensions) and liquid-liquid systems (emulsions). Modern constructional solutions are described. The results of international researches confirm the multiple applicability of hydrocyclones and the intensive product development. On the base of abovementioned it should be reasonable to overestimate the case of hydrocycloning recently neglected in our country.

1. Bevezetés

A ciklon konstrukcióját tekintve a legegyszerűbb folyamatos üzemi, centrifugális erőterrel működő szeparációs készülék. A ciklonban a centrifugális erőter a nyomás alatt, tangenciálisan bevezetett közeg-áramlás következtében jön létre. Rendszerüket tekintve a ciklonok lehetnek *gázciklonok*, azaz G–S fázisokat tartalmazó porleválasztók és *hidrociklonok*, azaz L–S folyadék és szilárd fázisokat, vagy L–L egymásban nem oldódó folyadék-folyadék fázisokat tartalmazó rendszerek, illetve ide sorolhatók az L–L–S, vagy az L–L–G hármas fázisokat kezelő műveleti egységek is. (L–folyadék, S–szilárd, G–gáz.)

A gázciklonra /Morse, 1886/ és a kúpos kialakítású víztisztító hidrociklonra /Bretney, 1891/ vonatkozó első szabadalmak több mint száz évesek. A portalanító gázciklon alkalmazása gyorsan terjedt. Ezzel szemben a L–S rendszerű hidrociklonokra az ipari érdeklődés – néhány kivételtől eltekintve – igazából csak a II. világháború után irányult. Magyarországon is ekkor jelentek meg az első publikációk a szén és érc előkészítés áramkészüleiről (Tarján Gusztáv), valamint az építőanyagipar (Demeter László, Bréda Gyula) és a cukoripar (Czirfusz Miklós) területéről. Tarján Gusztáv elméleti munkáira a hidrociklonban kialakuló áramlásokra és a szilárd szemcsék mozgásviszonyaira vonatkozóan még jelenleg is hivatkoznak. Következései közül egyedül a hidrociklonok nagyobb (40°–65°) kúpszögére tett ajánlását vitatták. A hidrociklonok fejlesztési tendenciáinak tárgyalásakor erre a kérdésre még visszatérünk.

Az egymásban nem oldódó folyadékokat szétválasztó L–L rendszerű, elsősorban olajipari hidrociklonok alkalmazása még későbbre tehető, elterjedésük csak a múlt század hetvenes-nyolcvanas éveiben vált erőteljessé. Ennek kiváltó oka az volt, hogy az olajkutakból feljövő olaj erre az időre egyre vízesebbé vált. Az Egyesült Államokban például már évi 15 billió barrel volt az olajat kísérő ún. termelt víz mennyisége. Jelenleg ez a termelt víz az olajipar legnagyobb volumenű mellékterméke. Szabadba vagy a tengerbe engedése ráadásul szigorú környezetvédelmi előírásokhoz kötött, Magyarországon például az előírt határérték mindössze 3 mg/liter! A víztelenítő hidrociklonok fejlesztésének további jelentős lökést adott a tengeri fúrótornyok egyre növekvő számú telepítése. Kiderült ugyanis, hogy a hullámzás és a szél okozta belengések miatt a hagyományos, gravitációs víztelenítők működése megbízhatat-

Dr. NÉMETH Jenő

Gyémántdiplomás vegyipari gépészmérnök, a Pannon Egyetem címzetes egyetemi tanára, a kémiai tudomány akadémiai doktora, a Műszaki Kémiai Kutatóintézet nyugdíjas tudományos tanácsadója.

VERDES Sándor

A Pannon Egyetem Gépészmérnöki Intézet (PEGM) Géptan Intézeti Tanszék egyetemi docense. Több mint 15 évet dolgozott a SZIKKTI kutató részlegén.

lanná vált. A nagy térfogatú, fekvő elrendezésű ülepítő tartályok elhelyezése a fúrótornyok platformjain uralkodó krónikus helyhiány miatt amúgy is problémás volt. A kis helyigényű és hatékony hidrociklonok, amelyekben a centrifugális gyorsulás a nehézségi gyorsulás értékének több százszorosa lehet, technológiailag előnyös alternatívát jelentettek a gravitációs szeparátorok kiváltására. A technológiai alkalmasság mellett az sem elhanyagolható szempont, hogy az olcsóbb hidrociklonokkal valamelyest kompenzálni lehet az olajkitermelés költségeinek növekedését.

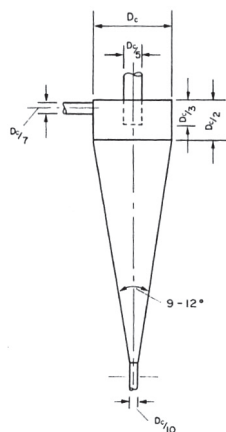
A hidrociklonok hatásosságának a növelésére, a kialakuló nyomásvesztés csökkentésére, a megfelelő szerkezeti anyag használatára és az újabb technológiai, például biotechnológiai alkalmazhatóság kikísérletezésére vonatkozó fejlesztő munka jelenleg is folyik. E széleskörű kutató-fejlesztőmunka intenzitását a négyévente megrendezett nemzetközi konferenciák jól szemléltetik, így például az 1992-ben Southamptonban rendezett IV. Hidrociklon konferencia kiadványa vagy az 1996-os Cambridge-i konferenciáról megjelent könyv [1, 2]. A dolgozat célja a hidrociklonok konstrukciós K+F munkájának rövid áttekintése és a kutatási tendenciák bemutatása.

2. A folyadék–szilárd (L–S) rendszerű hidrociklonok

Az 1. ábrán egy tipikus hengeres-kúpos, szuszpenziót szétválasztó hidrociklon látható a fontosabb geometriai paraméterek méreteinek a feltüntetésével. A hidrociklonok esetén elterjedt gyakorlat értelmében a hengeres köpeny D_c átmérője az összes többi méret viszonyítási alapja.

Tarján szerint [3] a szuszpenziót szétválasztó L–S rendszerű hidrociklon olyan áramkészülék, amelyben a szilárd fázis szemcseosztályozását eldöntő, mértékadó közegáramlás a centrifugális erő irányával ellentétesen kialakuló radiális sebességkomponens. A nehezebb szemcsék az alsó kifolyásba, a könnyebbek a felső kifolyásba kerülnek. Itt jegyezzük meg, hogy a derítő szupercentrifugákhoz hasonlóan a hidrociklonnal sem lehet teljesen éles elválasztást biztosítani [4]. Az elválasztás élességét azzal lehet fokozni, ha sorba kötött, több testes hidrociklonokat alkalmazunk. A Pörner Engineers+Contractors Plc. megbízásából Németh ezért javasolt egy háromtestes hidrocik-

lon modult, amely egy álló és két, ehhez felül és alul vízszintesen csatlakozó hidrociklonból állt, a MOL Rt. Dunai finomító Merox üzemi lúgos előmosó rendszerének az intenzifikálására. A javaslat értelmében készült tervezői adatszolgáltatás szerint 250, 200 és 150 mm volt az egyes ciklonok átmérője.



1. ábra Tipikus hengeres-kúpos hidrociklon vázlatos rajza
Fig. 1. Draft drawing of typical cylindrical-conical hydrocyclone

A mozgó alkatrészeket nem tartalmazó, egyszerű konstrukciójú hidrociklonban igen bonyolult az áramkép. Kellsall [5] és Rietema [6] alapvető munkái óta még jelenleg is a legtöbb publikáció a hidrociklonban kialakuló összetett áramlás tisztázásával foglalkozik. A hidrodinamikai bonyolultságot fokozza, hogy a hidrociklonban kialakuló 3D-s örvénymozgás nem izotróp, nem tengelyszimmetrikus és a tengelyvonalon képződő légmag recessziós mozgása miatt az áramkép még időben is változik. Nagyobb szilárdanyag koncentrációnál már nem teljesülnek a szabad ülepedés feltételei. A szemcsék mozgásának és a folyadék áramlásának kölcsönhatása szintén a tisztázandó kérdések közé tartozik.

A numerikus áramlástan, CFD (Computational Fluid Dynamics) segítségével [7] az utóbbi években több publikáció is megjelent az előzőekben vázolt, igen bonyolult áramkép leírására [8, 9]. A 3D-s örvénymozgás numerikus kezelésekor a turbulencia modellek validálását azonban minden esetben el kell végezni, ami viszont csak gondosan kivitelezett, korszerű mérés technikával, például a kétsugaras LDV (Laser Doppler Velocimetry) vagy a Műszaki Kémiai Kutató Intézetben is használt PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) használatával végzett kísérletek adataival lehetséges. Ígéretes, bár költséges módszer az újabban alkalmazott EIT (Electrical Impedance Tomography), vagy ERT (Electrical Resistance Tomography) módszer [10]. Az egyes szimulációs modellek érvényességét ugyanakkor behatárolja az a tény, hogy az elméleti modellek csak addig használhatók, amíg az alkalmazás paraméterei kielégítik a modell peremfeltételeit. Az előzőek alapján nem meglepő, hogy a mai napig nem ismert olyan elmélet, amely a tangenciálisan belépő és a köpeny mellett lefelé csavarodó, illetve a tengelyvonalon spirálisan felfelé mozgó szuszpenzió turbulens áramlását egységesen leírná.

A már említett Rietema [6] $D_c = 75$ mm átmérőjű hidrociklonnal végzett, nagyszámú és szisztematikusan változtatott paraméterű kísérletsorozatokkal igazolta, hogy az L-S rendszerű hidrociklonok optimális méreteire a következők érvényesek:

$$\begin{aligned} D_i/D_c &= 0,28, & D_o/D_c &= 0,34, & l/D_c &= 0,4, \\ L/D_c &= 5, & h/D_c &= 0,75-1,0 \text{ és} & D_o/D_u &= 1,33-1,66, \end{aligned}$$

ahol
 D_i a tangenciális bevezetés,
 D_o az örvénykereső cső átmérője,
 l az örvénykereső cső benyúlása a hengeres testbe,
 h a hengeres kamra hosszúsága,
 L a hidrociklon teljes hossza és
 D_u az alsó kifolyás átmérője.

A szerző azt is kimutatta, hogy 10° -os kúpszögű hidrociklonnal 15–20%-kal élesebb elválasztás érhető el, mint a 20° -os kúpszögű egységgel.

Az osztályozóként működő hidrociklon átmérője általában $D_c = 300-450$ mm, a teljes hossza $L = 1000-1500$ mm, az együttülepedés szerinti osztályozás szokásos mérettartománya 5–297 μm . 300 μm -nál nagyobb szemcsék szétválasztása más típusú osztályozókkal is előnyös lehet. A betáplálás (Q_i) lineáris sebessége 10–14 m/s között változik. A tapasztalat szerint az elválasztás hatékonysága nagyobb belépési sebességgel növelhető lenne, ennek azonban a hidrociklon megnövekedő nyomásesése és az esetlegesen bekövetkező erózió határt szab. A betáplálási túlnyomás rendszerint 0,35–4,2 bar közötti érték. A betáplálás szokásos szilárdanyag tartalma 10–60%. Nagy koncentrációnál az alsó kifolyás (Q_u) akadózhat. A szemcsék esernyőszerű szétporlasztása helyett a kifolyás dugószerűvé válhat, ami elakadást is okozhat. Ezt a körülményt célszerű elő-kísérletekkel tisztázni. Szükség esetén a kúpos szakaszba vezetett lazító, öblítő víz bevezetésével lehet a hidrociklon működőképességét fenntartani.

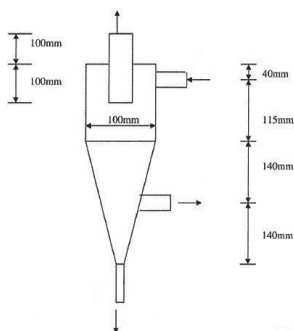
A hidrociklonok Q_i feldolgozási képességére és a szilárd szemcse x osztályozási (más publikációkban ennek a jelölése d_{50}), vagy a leválasztási határméretére a Fejes-Tarján tankönyv [3] közöl használható adatokat. Bradley a teljesítményképleteket elméleti és tapasztalati összefüggésekre bontva elemzi [11]. A könyv 85. ábrája a Dorr cég TM3 típusú multiciklonos egységét ábrázolja, ahol a három multiciklon toronyszerűen egymásra épül, és a közös házba foglalt, függőlegesen elrendezett 40 mm átmérőjű hidrociklonok 60, 180 vagy 300 darabszámában kerülnek beépítésre. E példa említésének az ad aktualitást, hogy az Ajkai Timföldgyárban az alumínátlúgból a kikeverő tartályokban leválasztott timföldhidrát zagyot az oltóhidrát zagyotól Dorr-féle multiciklonokkal választják szét.

Ha a feladásban a leválasztási határméretnél nincs (vagy csak kevés a) finomabb szemcse, akkor a hidrociklon zagysűrítőként működik. Ha a hidrociklont besűrítőként alkalmazzák, akkor az átmérője rendszerint kisebb, mint 100 mm. Finoman diszpergált szuszpenziók esetén a hidrociklon átmérője még kisebb, értéke 10–50 mm. A kis átmérőjű, következésképpen kisebb teljesítményű hidrociklonokat a nagyobb feldolgozás érdekében multiciklonokba építve működtetik. A multiciklonok szerkezeti kialakítása a gyakorlatban kétféle. Az első típusnál a centrálisan elhelyezett központi elosztó tartályhoz, illetve a ciklonok Q_o felső elfolyását gyűjtő edényzethez sugárasan csatlakoznak kívül a kisméretű, általában a berendezés középvonala felé kissé ferdén elrendezett hidrociklonok. A másik elrendezés a csőköteges hőcserélők felépítését követi. A köpenybe vízszintesen beépített hidrociklonok terhelése ebben az esetben kevésbé egyenletes és az eldugulás elhárítása is

munkaigényesebb, mint az előző típusnál. A különböző gyártók készülékeit Bradley a könyve 10. fejezetében részletezi [11].

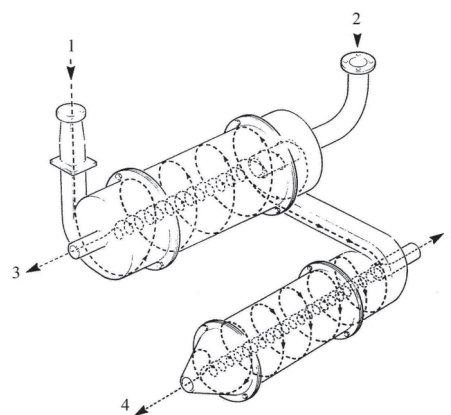
Ha a hidrociklont víz helyett megfelelő sűrűségű *nehézsuszpenziós* fluidummal működtetik, akkor a szilárd fázis szétválasztása néhány tized mm-től 10–20 mm szemcseméretig nemcsak a különböző méretű szemcsékhez tartozó különböző ülepedési sebesség alapján lehetséges, hanem a feladásban levő szilárdanyag különböző sűrűsége alapján is. Ilyen rendeltetésű hidrociklonokat alkalmaznak az ércfeldolgozásnál, ahol a fémeket a meddőtől kell elválasztani [12].

Más iparágaknál is napi feladat különböző sűrűségű szennyeződések eltávolítása. Például a papíriparban ilyen feladat a papíriszapnál könnyebb és nehezebb szennyeződések eltávolítása. Ennél a technológiánál a többtestes kapcsolás honosodott meg. Az első hidrociklon felső kifolyása a tisztított iszap (pulp). Az alsó elvezetés a második lépcső betáplálása, ennek alsó kifolyása tartalmazza a nehéz szennyeződések, míg a harmadik hidrociklon felső elvezetésébe kerülnek a papírnál könnyebb szennyeződések. A rendszer fejlesztését szolgálja a *három-termékes* hidrociklon alkalmazása, amikor is a hidrociklon köpenyén képeznek ki egy D_m átmérőjű elvezetést a felső könnyebb és az alsó elvezetés nehezebb terméke közötti köztes sűrűségű termék számára [13]. A három-termékes hidrociklon méretezett vázlatát mutatja a 2. ábra. Osztályozóként működtetve az egyes csőátmérők a következők: $D_o = 34$ mm, $D_m = 14$ mm, $D_u = 24$ mm. Sűrítőként alkalmazva ezek a méretek a következők: $D_o = 34$ mm, $D_m = 6$ mm és $D_u = 24$ mm. A három-termékes hidrociklonok fejlesztésével kapcsolatos további munkáról Bednarski ad széleskörű áttekintést [1]. Természetesen kéttestű hidrociklonnal is szét lehet három terméket választani, de két készüléknek nagyobb a beruházási költsége és a két hidrociklon nyomásesése az üzemi költséget is megnöveli. Ehhez járul még a két hidrociklonban kialakuló belső áramlások, ezen belül a megosztási hányad (Q_u/Q_o) szabályozási kérdése is.



2. ábra Három-termékes hidrociklon vázlatos rajza
Fig. 2. Sketch of three-product hydrocyclone

Újabbán a szénmosásra is három-termékes hidrociklont ajánl a British Coal Corporation [1]. A LARCODEMS szeparátor kialakítása a 3. ábrán látható. A ferde elrendezésű hidrociklon hengeres kialakítású és 250 t/h osztályozatlan szén szeparálására alkalmas, miközben a szén szemcse-frakciója 0,5–100 mm közötti lehet. A hengeres rész átmérője eléri a 300 mm-t. A ferde elrendezéssel a hidrociklon hidrosztatikai nyomását lehet hatásosan csökkenteni. Ezzel együtt a betáplálási nyomás is csökkenthető.



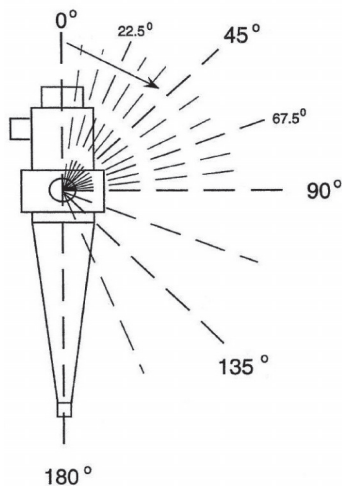
3. ábra Három-termékes szénmosó hidrociklon vázlatos rajza
1 - nyers szén betáplálás kevés folyadékkal, 2 - szeparáló folyadék bevezetés, 3 - mosott szén elvezetés, 4 - nagytűrségű anyag elvezetés, 5 - közbelső sűrűségű anyag kilépés
Fig. 3. Sketch of three-product hydrocyclone with for coal washery
1 - raw material feeding with less liquid, 2 - input of separating liquid, 3 - outlet of washed coal, 4 - outlet of high density media, 5 - outlet of intermediate density product

A nedves őrlésű golyósmalmokhoz elterjedten használnak zárt, körfolyamatban működő osztályozó hidrociklonokat, amelyek általában nagy méretű egységek. Az átmérő 660–840 mm, a teljes magasság pedig eléri a 2,5–3 métert. Egyértelmű, hogy ferde, 45°-os elrendezés esetén számottevően csökken az alsó kifolyónyílásra ható nyomás, ami növeli az osztályozó élettartamát. A ferde elrendezés ugyanakkor 20–40 %-kal növeli a d_{50} értékét. Megjegyezzük, hogy a durvább szemcse leválasztás a nagy kapacitású osztályozóknál gyakran technológiailag előnyös.

A hazai rudabányai pátvasérc-dúsítás 1960–62 évi technológiája az 1965–67-es években kiegészült egy golyósmalomból és hidrociklonokból álló aprító-osztályozó berendezéssel. A pátvasérc magas réztartalmát (Cu 0,10–0,15%) később flotálással csökkentették [22]. A kétlépcsős technológia első részében a barit elő-flotálását végezték, amit a második lépcsőben a barit tisztító flotálása követett. Mindkét műveleti körhöz egy aprító-osztályozó körfolyamatos rendszer tartozott, amely nedves üzemű golyósmalomból és Demeter-féle osztályozó hidrociklonból állt ($D_c = 200$ mm). A hidrociklon örvénykereső csővén kilépő anyagáramban a 200 μm -nél nagyobb szemcsék mennyisége nem haladhatta meg a 6%-ot. Az ásványelőkészítésben más területen is használt berendezés a hidrociklon [23].

A hidrociklon ferde elrendezésével kapcsolatban figyelmet érdemel Asomah és Napier-Munn dolgozata [2], amelyben a 4. ábra szerinti módon, a hagyományos függőleges és a 135° ferdeségű tartományban végzett összehasonlító kísérletekről számoltak be. A kísérletekhez két Krebs gyártmányú hidrociklont használtak 508 és 101,6 mm átmérővel. A hengeres rész hossza értelem szerint 770 mm és 247,7 mm volt. A kúpszögek pedig 20° és 12° értékűek. A rézérc koncentrációja a betáplálásban 22–72% között változott. A ferdeség változtatásakor a hidrociklonok nyomásvesztését 60 és 120 kPa nyomáson állandó értékeken tartották. Az üzemi próbák azt igazolták, hogy a ferde elrendezés befolyásolta a szétválasztás teljesítményét, a nagyobb egységnél jobban, mint a kisebbnél. A d_{50} értéke nőtt, például 30 μm -ról 45 μm -re. Az alsó kifolyás sűrűsége és víz-

tartalma is nőtt. Az említett hatások a 45° ferdeségig alig jelentkeztek, a nagyobb ferdeségeknél enyhe lineáris növekedés volt megfigyelhető.



4. ábra Ferdén elhelyezhető kísérleti hidrociklon vázlatos rajza
Fig. 4. Test hydrocyclone with position changing possibility

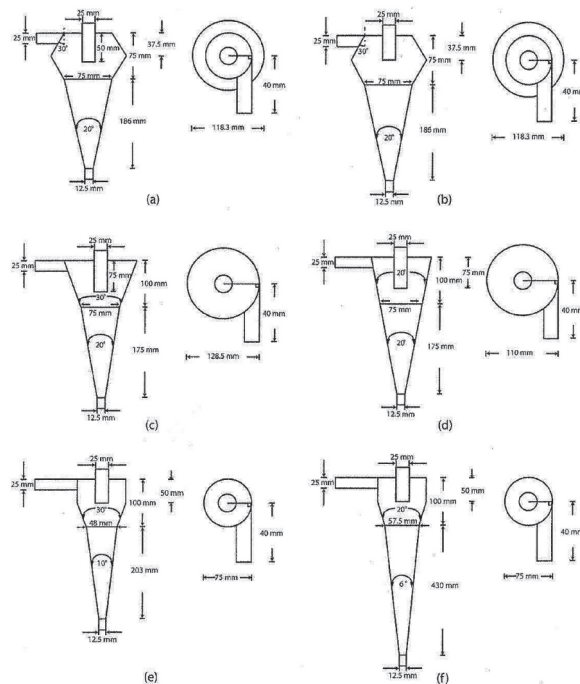
A hidrociklon konstrukciójára vonatkozó újabb vizsgálatok alapján igazoltnak tekinthető, hogy szögletes, például téglalap keresztmetszetű tangenciális bevezetés esetén nagyobb a hidrociklon hatékonysága, mint amikor a bevezetés kör keresztmetszetű, valamint az, hogy az evolvens kialakítású betáplálás költségesebb konstrukció ugyan, de kedvezőbb, mint az egyszerű tangenciális csatlakozás.

Ha az örvénykereső csőhöz, vagy az alsó kifolyáshoz könyökök és további csövezetékek csatlakoznak, akkor ellenőrizni kell a hidrociklon elfolyásai között kialakuló nyomásviszonyokat, mert ez befolyásolja a split-nek nevezett, $S = Q_u/Q_o$ megosztási hányad értékét. Jelenlegi ismereteink szerint az S optimális értékét előkísérletekkel célszerű tisztázni. A tervezés során külön elemezni kell, hogy a megosztási hányad szabályozását lehetővé tevő szerelvényekkel nem sérül-e a megbízható üzemvitel, és ezek nyomásvesztésével járó energianövekedésnek mi a gazdasági kihatása.

A legújabb konstrukciós fejlesztő munkát egyrészt a hibrid eljárások alkalmazási lehetőségének a vizsgálata jellemzi, másrészt a számítógépes modellezés és a kísérleti munka ötvözete.

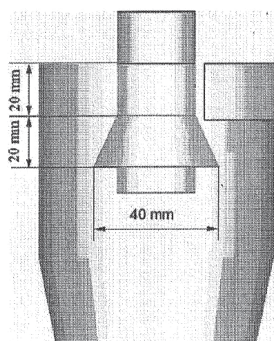
A hibrid eljárásra példa az *elektromos hidrociklon* vizsgálata. Japán kutatók [14] 2 µm medián átmérőjű igen finom szilícium szeparálására fejlesztették ki az új elektromos hidrociklont, ugyanis a hagyományos hidrociklonban kialakuló centrifugális erőterrel a 4–5 µm-nél kisebb szemcsék osztályozása gyakorlatilag nem kivitelezhető. Megjegyezzük, hogy a Brown-féle mozgás a 0,1–1 µm-es szemcséknél kezd jelentkezni. A szerzők a 20 mm átmérőjű hidrociklon kúpos részébe centrikusan egy negatív elektródot építettek be. Az egyenáramú generátor feszültségét 100 V-ig lehetett szabályozni. A betáplált szuszpenzió koncentrációja 0,1–2 m/m% között változott. A szerzők azt tapasztalták, hogy az osztályozás hatékonyságának a növeléséhez legalább 40 V feszültségre volt szükség. Ugyanakkor a d_{50} elválasztási szemcseméret csak az 1,5 m/m%-nál kisebb betáplálási koncentrációk esetén csökkent. Nagyobb koncentrációk esetén a d_{50} értéke is nőtt.

A korszerű konstrukciós fejlesztés másik iránya a *numerikus áramlástan* modelljei segítségével történik. Az Utah-i egyetem kutatói [15] azt vizsgálták, hogy az ásványfeldolgozás zárt-körű nedves őrlésénél évtizedek óta használt hengeres-kúpos, úgynevezett standard hidrociklon [16] hatásosságát hogy lehet növelni a készüléktest módosításával. Hatféle változatot (l. az 5. ábrát) modelleztek. A hidrociklonok átmérője egységesen 75 mm volt. A 3D-s turbulencia modell egyenleteinek a megoldásához a Fluent™ 6.0 programot használták. Azt találták, hogy az (a) és (b) változat nem volt jobb, mint a standard alaptípus. A (d) és (e) változatok szétválasztási hatékonysága kb. azonos volt a standard típussal, míg a (c) és (f) esetén a szeparáció élesebb volt. A számított javulás egyrészt azért következett be, mert csökkent az örvénykereső cső melletti ún. rövidre zárás hatása, másrészt a készülék alján kialakuló erősebb spirálmozgás miatt kevesebb finom szemcse csúszott le a köpeny mellett az alsó lefolyásba, ellenkezőleg, a felfelé irányuló szekunder spiráláramlásba kerültek. Az előzők alapján a hat változat helyett csak e két utóbbi konstrukciót kell üzemileg tesztelni. A CFD módszer és a kísérleti munka vázolt ötvözete jelentős idő- és költségcsökkentést jelent. Megjegyezzük, hogy a nem-newtoni biológiai közegek hidrociklonos kísérletei alapján ugyancsak a (c) és (f) típusú készülékekkel értek el pozitív eredményeket [2].



5. ábra Lehetséges hidrociklon kialakítások
Fig. 5. Possible hydrocyclone forms

Az előzővel hasonló jellegű Wang szimulációs munkája [17] is, aki az örvénykereső csőre vonatkozó számos egyéb variáció mellett a 6. ábra szerinti terelő-kúpos örvénykereső cső konstrukcióját találta kedvezőnek a nyomásesés csökkentésére, az áramlás S megosztási hányadára, a szemcsemozgás trajektóriáira és az elválasztás élességére. Az elvégzett kísérletek igazolták, hogy az ábra szerinti örvénykereső csőnél az elválasztást rontó, ún. rövidre-zárási hatás, amely a betáplálás és az örvénykereső cső között jelentkezhet, a terelő kúp miatt ténylegesen csökkent, és ezzel javult az elválasztás élessége.



6. ábra Az örvénykereső cső módosított kiviteli vázolata
 Fig. 6. Drawing of the modified vortex finder tube

3. A folyadék–folyadék (L–L) rendszerű hidrociklonok

Az egymásban nem oldódó folyadékok, azaz az L–L rendszerű hidrociklonokra a folyadék–szilárd fázisú hidrociklonokra tett előző megállapítások, így pl. a készüléktest optimális geometriai méreteire, közvetlenül nem alkalmazhatóak. Ennek egyrészt az az oka, hogy a szétválasztás hajtóerejéül szolgáló sűrűségkülönbség a folyadékok között egy nagyságrenddel kisebb, mint az L–S fázisú rendszereknél. Másrészt, a folytonos fázisban diszpergált folyadék cseppek, ellentétben a szilárd fázis szemcséivel, a 3D-s turbulens áramlásban fellépő nagy, 10–15 m/s nagyságú tangenciális sebességek miatt töredeznek, méretük nem marad állandó. Előfordul, hogy a cseppek nemcsak aprózódnak, hanem esetenként nagyobbakká koagulálnak. Következésképpen a diszpergált folyadék cseppeloszlása nem állandó a hidrociklonozás során, ellentétben a szilárd fázis szemcseeloszlásával.

Fontos következtetéseket vontak le a Braunschweigi Egyetem kutatói az orsóolaj-víz emulzióval végzett vizsgálatokból is, amelyhez egy 50 mm átmérőjű és 14° kúpszögű hidrociklont használtak. A méréseket 60 °C-on végezték. Változó belépési sebességnél mérték a Q_0 és Q_u kilépő térfogatáramokat és az ezekhez tartozó ε_0 és ε_u szétválasztási tényezőket. Megállapították, hogy egyidejűleg csak az egyik folyadék komponens nyerhető ki tisztán. Függetlenül attól, hogy a könnyű vagy a nehéz folyadék volt a diszperz fázis, például olaj a 83% vízben, vagy víz a 90% olajban, a szétválasztás jellege hasonló volt. Kimutatták, hogy a megosztási hányad erősen függ a hidrociklon nyomásvesztésétől, és ezen keresztül a készülék konstrukciós kialakításától. Megállapították, hogy a belépési sebesség növelésével nem nőttek folytonosan az elválasztási tényezők, hanem egy kritikus érték után csökkentek. Víztelenítés esetén ez az érték max. 6 m/s volt 10% víztartalom esetén (nagyobb víztartalomhoz kisebb optimális érték tartozott). Olajtalanítás esetén a kritikus érték 4,5 m/s volt, függetlenül a koncentrációtól. Nagyobb sebességeknél elválasztás helyett, meglepetésre, emulgeálás következett be. A hidrociklon optimális olajtalanítási térfogat teljesítménye ezzel az értékkel 1,4 m³/h volt.

A különböző kritikus sebességek miatt különböző geometriai méretekkel rendelkeznek a hidrociklonok aszerint, hogy olajtalanítás vagy víztelenítés a szeparálás műveleti célja. Megjegyezzük, hogy ez a jelenség, miszerint az L–L rendszerű

hidrociklonoknál a betáplálási sebességnek optimuma van, új megállapítás, mert az L–S rendszerűeknél ez nem tapasztalható. A kétféle rendszer összevetéséből az is kitűnik, hogy az L–L rendszerű hidrociklonok betáplálási sebessége lényegesen kisebb, mint az L–S rendszerű hidrociklonoknál alkalmazott értékek. Következésképpen egységteljesítményük is kisebb. Azért, hogy a kisebb sebesség miatt a centrifugális erőtér ne csökkenjen, a folyadék–folyadék szeparációs hidrociklonok kis átmérővel készülnek. Ezért koncentrálódnak az L–L rendszerű hidrociklonok méreteire vonatkozó fejlesztés jelenleg az ún. *mini-hidrociklonokra*. A $D_c = 10\text{--}25$ mm átmérőjű egységek, esetenként százas nagyságrendben, multiciklonokba kerülnek beépítésre, hogy a párhuzamos kapcsolással biztosítsák a telep nagyobb teljesítményét. A multiciklonok kialakítása a csököteges hőcserélők mintájára rendszerint fekvő kivitelű, egy beömlésű és az igényeknek megfelelően nyomásálló kivitelű berendezés.

A mini-hidrociklonoknál a szűk rádiusz-tartomány miatt elégtelen lehet a tangenciális bevezetés realizálódása a centrifugális erőtér kialakítására. Ilyen esetekben jelenthet megoldást az örvénykereső cső és a ciklon hengeres fala közé épített gyűrű alakú, ferde, vagy ívelt lapátosítású, álló keréktárcsa. A *centriklonnak* is nevezett hidrociklonban a tárcsa hat, vagy nyolc lapátja nemcsak a bevezetett közeg perdületét fokozza, hanem intenzifikálja az axiális irányú sebességet is.

Az L–L rendszerű hidrociklonok leválasztási hatásossága függ a hőmérséklettől is. Az arányosság fordított. A hatékonyság nő, ha a hőmérséklet csökken. A hőmérséklet csökkenésekor nő a diszperz és a folytonos fázis viszkozitása, a vízé jobban, mint az olajé. Ha nagyobb a viszkozitás, akkor csökken a cseppek aprózódási hajlama, ami előnyös az elválasztás szempontjából.

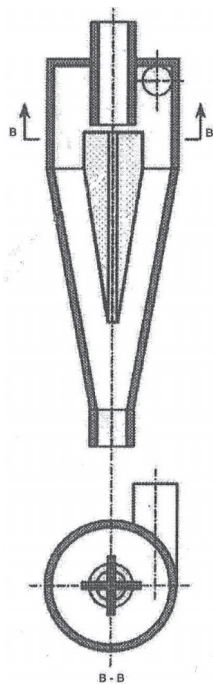
A hidrociklonok tengelyvonalaiban kialakuló ún. *légmagot* sokan vizsgálták, de a jelenség precíz magyarázata még jelenleg is hiányzik. Tisztázatlan például, hogy miért hullámos a légmag folyadékkal érintkező felülete, vagy mi befolyásolja a légmag recessziós mozgását. A légmag kialakulásáról és jellegéről a következők ismertek:

A légmag minden esetben kialakul, ha akár a felső, akár az alsó kifolyás érintkezik a légkörrel. Az áramlástanai vizsgálatok szerint, lásd pl. az [5, 6, 10] irodalmakat, a hidrociklon tengelyének a közelében akkorára nőhet az áramlás tangenciális sebessége, amihez a Bernoulli egyenlet értelmében fellépő nyomáscsökkenés már vákuumot eredményez. Ennek mértéke néhány száz vízoszlop mm-től 1000–2000 vomm-ig terjedhet. A szabadból ez a vákuum szívja be a légmagba a levegőt. Ha a kifolyások zárt tartályokba történnek, az általános vélemény szerint akkor is kialakul légmag a hidrociklonban, mert ekkor a folyadékból felszabaduló gőz vagy gáz tölti ki a légmagot, amelynek az átmérője 0,06 D_c -től 0,33 D_c -ig változhat. A nagyobb érték a nagyobb tangenciális sebességekhez tartozik. A légmag összeeshet, ha a tangenciális sebesség erősen lecsökken. A légmag kialakulásához egy minimális belépési sebesség és minimális kezdeti nyomás szükséges. Hagyományos kialakítású hidrociklonokban ez utóbbi értéke kb. 0,15 bar. Ha a légmag nagy átmérővel alakul ki, akkor előfordulhat, hogy az átmérője nagyobb lesz, mint az alsó kifolyónyílás átmérője. Ilyenkor megszűnhet az alsó kivezetés. Tiszta víz esetén ez az állapot ténylegesen megfigyelhető.

A légmag lengése és recessziós mozgása nyomásingadozásokat generál, ami kihat az áramlás radiális sebességére. Ez viszont hátrányosan befolyásolja a hidrociklon hatásosságát. A konstrukciós fejlesztések egy része ezért az áramlást *stabilizáló* szerkezeti megoldásokra irányul.

A Southampton-i egyetem kutatói [20] az alsó kifolyónyíláshoz a nyílás átmérőjével azonos átmérőjű, de $(9-13,5)D_c$ mm hosszú, ún. *stabilizáló* csövet csatlakoztattak, amivel sikeresen csillapították az áramlás instabilitását.

További megoldásokat tüntet fel a következő két ábra. A 7. ábrán egy keresztzárnyas betétdarab csillapítja a hidrociklonban a nyomásfluktuációt [10]. A 8. ábrán viszont egy perforált hengeres-kúpos betéttel lehetett a hidrociklon elválasztási hatásosságát növelni [10]. A perforált betét részben módosította a belső örvény kialakulását, részben torlasztó hatást fejtett ki a tengelyvonal felé irányuló radiális sebességre azzal, hogy erősítette a hidrociklon kúpos része felé az axiális áramlást.



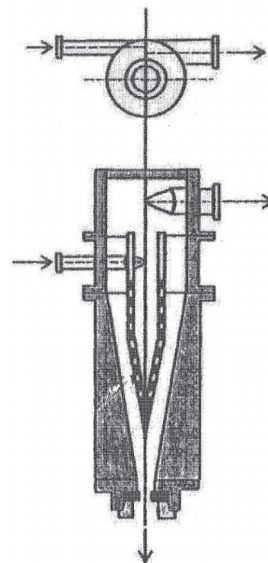
7. ábra Keresztzárnyas csillapító betétdarab
Fig. 7. Winged central core to lower pressure fluctuation

Az L-L rendszerű hidrociklonok internetes irodalomfigyelése alapján a készüléktest méreteire vonatkozóan a következő megállapítások tehetők:

A D_i/D_c arány itt is 0,28 érték, azaz ugyanaz, mint az L-S rendszerű hidrociklonoknál. Az örvénykereső cső benyúlására az $l/D_c = 0,33-0,4$ értékek az ajánlottak, míg a kisebb nyomásvesztés elérése miatt kissé rövidebb a hengeres szakasz, azaz $h/D_c < 1$. A víztelenítő hidrociklonoknál $D_o/D_c = 0,13$, míg az olajtalanítóknál ez az érték 0,04. Az alsó ürítő nyílásra $D_u/D_c = 0,18-0,26$ arány az ajánlott. A kereskedelemben kapható olajtalanító hidrociklonok átmérője rendszerint 75–100 mm. A készülékleírás szerint ezek az egységek üzemszerűen a 30 μm méretű olajcseppek 98%-át képesek leválasztani.

A víztelenítő hidrociklonok kúpszöge $10-20^\circ$ között változik. Az olajtalanító hidrociklonok karcsúbbak, ezeknél a típusoknál a kúpszög intervalluma 2° és 10° közötti érték.

A tapasztalat szerint a nem elegendő folyadékok bevezetésére nem egy, hanem két, átellenesen kiképzett tangenciális csövet célszerű alkalmazni.



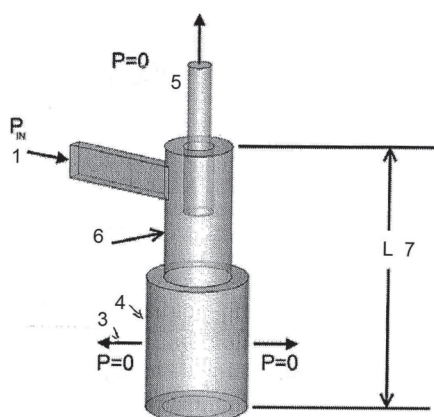
8. ábra Perforált kosár alakú betétdarab
Fig. 8. Perforated basket-shape core

Bradley [11] a hidrociklon tervezési változói között a geometriai méretek mellett a *szerkezeti anyagokat* is felsorolta. A megfelelő szerkezeti anyag kiválasztása az L-S rendszerű hidrociklonoknál fellépő eróziós hatás miatt igényel kiemelt figyelmet. A gumi (főleg lágy gumi 12 vagy 25 mm vastagsággal), esetleg szilikon-karbid bélelésű hidrociklonok mellett a foszforbronzból, a titánból, vagy porcelánból készült típusok is megjelentek a különböző gyártmánylistákon, sőt újabban műanyagból, üvegszálalás műanyagból, fém-kerámia, illetve polimer kompozitból készült hidrociklonok közül lehet választani. Ha a Mohs skálán 5° -nál keményebb anyag a szuszpenzió szilárd fázisa, akkor a porcelán hidrociklon élettartama kb. 1400 óra, míg a többi 400 óra körüli érték. Esetenként érdemes az erózióknak erősen kitétt alsó kifolyónyílást cserélhető csomópontként kialakítani. Az L-L rendszerű hidrociklonoknál a készülék fala és a nehezebb folyadék közötti nedvesítési szög lehet a kiválasztást segítő paraméter. Ismert, hogy az illeszkedési, vagy kontakt szög vízre saválló acélnál 46° , víz/teflon kapcsolatnál 91° , míg dízelolaj/saválló acélnál 2° , dízelolaj/teflon esetén pedig átlagban 39° . Perspeknél ezek az értékek 72° és 5° értelem szerint. A szerkezeti anyag és a hidrociklon hatásossága közötti kapcsolatot Listewnik vizsgálta [2]. A szerző megállapította, hogy víz/olaj rendszerű, egyébként azonos feltételek mellett, 6 m^3/h kapacitás esetén a saválló acélnál készült hidrociklonnak a legkisebb (kb. 65%) a hatékonysága, míg ha teflon a szerkezeti anyag, akkor a hatékonyság a legnagyobb, közel 80%. 13–14 m^3/h kapacitásoknál azonban mind a három előbb említett szerkezeti anyag esetén egységesen 90–95% volt a maximális szétválasztási hatékonyság. A kísérleteknek az adott aktualitást, hogy Lengyelországban a múlt század nyolcvanas éveitől kezdve a hajókon keletkező ún. olajos hajóvíz olajtalanítását végző tisztítási rendszerhez az olajtalanító hidrociklonok már szervesen hozzátartoznak.

Az L-L rendszerű hidrociklonok különleges konstrukciós fejlesztései közül a szűrővel kombinált hidrociklont és a hengeres kialakítású hidrociklonokat lehet kiemelni.

A szűrési lehetőséggel kombinált ciklon tulajdonképpen az L-L-S rendszerek kezelésére alkalmas speciális, három-termékélvételes kialakítás. A hidrociklon kúpos alsó része dupla falú, a belső fal a perforált szűrőfelület és az ezen átfolyó szűrlet a közbenső termék. A hidrociklon szétválasztó képessége a szűrlet miatt természetesen megnőtt, ugyanakkor nem várt módon a hidrociklon nyomásesése lecsökkent.

A 9. ábrán látható hidrociklon mikroszűrővel kombinált hengeres konstrukció. A ciklon hagyományos hengeres szakaszához a kúpos alsó rész helyett egy további hengeres rész csatlakozik, amelynek fala a keramikus TiO_2 mikroszűrő membrán, $1,4 \mu\text{m}$ -es pórus átmérővel.

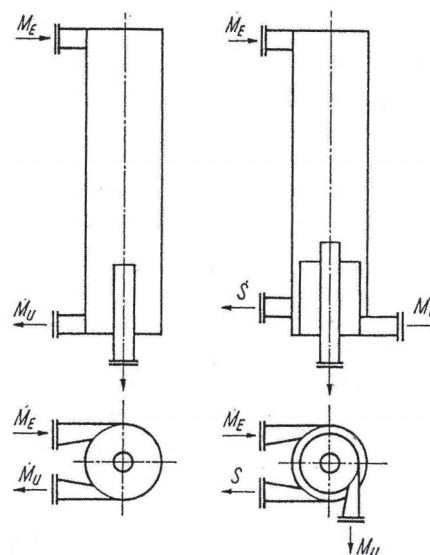


9. ábra Mikroszűrővel kombinált hidrociklon vázlatos rajza
 1 – bevezetés, 2 – felső kifolyás, 3 – permeát, 4 – porózus mikroszűrő,
 5 – örvénykereső cső, 6 – hidrociklon átmérő
 Fig. 9. Hydrocyclone combined with micro-filter
 1 – feeding, 2 – upper outflow, 3 – permeat,
 4 – porous micro-filter, 5 – vortex finder, 6 – hydrocyclone diameter

A permeát fluxusát 20 kPa nyomás biztosította. A 0,024 m/m%-os olaj/vízzel végzett kísérletek szerint a mikroszűrőn keresztirányban átáramló víz, mint alsó átfolyás, volt a tisztított termék. A víz térfogatárama a szűrő időben növekvő ellenállása miatt némileg csökkent, de a víz olaj koncentrációja a teljes szűrési idő alatt végig kisebb volt, mint 20 mg/liter. A hidrociklon felső részének geometriai méretei a Rietema szerinti optimális méretarányokat követték [21].

A hagyományos hengeres-kúpos hidrociklonokban a külső fal mellett lefelé csavarodó, majd a tengelyvonalon spirálisan felfelé áramló rendszer által generált 3D-s turbulencia az emulzió szempontjából sem kedvező. Ezért már a múlt század hatvanas éveiben felvetődött az egyirányú áramlást és ezáltal a kiszámíthatóbb ülepedési feltételeket lehetővé tevő hengeres hidrociklonok alkalmazásának gondolata [18]. A 10. ábra két megoldási elvet szemléltet. A baloldali vázlat szerint a szétválasztandó emulzió felül lép be tangenciálisan a hengeres testbe. A könnyű fázis az alul axiálisan beépített örvénykereső csővön keresztül távozik, míg a vízben dús vegyes fázis az alul levő tangenciális csővön keresztül lép ki a hengeres testből. A lefelé csavarodó áramlásban a két fázis határfelülete sokkal egyértelműbben kialakult, mint a hagyományos hidrociklonban, ezért az elválasztás is élesebb lehet. A jobboldali vázlat

szerint a működési elv hasonló, de a konstrukció egy készüléken belül is lehetővé teszi a két fázis szétválasztását. Látható, hogy a vegyes fázis az örvénykereső cső és a vele koncentrikus második cső közötti térből távozik tangenciálisan. A könnyű fázis ez esetben is alul, középen távozik. Mindkét kialakításnál előnyt jelent a hengeres-kúpos hidrociklonok felső tangenciális bevezetése és a centrikus felső elvezetés között kialakuló, ún. rövidre zárási veszteség elmaradása, valamint az, hogy a hengeres rész hosszának a növelésével egyszerűen növelhető a tartózkodási idő és ezzel az elválasztás hatékonysága.



10. ábra Hengeres hidrociklon vázlatos rajza
 Fig. 10. Draft drawing of cylindrical hydrocyclone

Az ismertetett hengeres hidrociklon végső soron a centrifugális erőterű hagyományos ciklon és a gravitációs ülepitő kombinációja.

Svéd kutatók a közelmúltban már a hengeres hidrociklon numerikus modellezéséről számoltak be [9]. Az általuk vizsgált hidrociklon – a 10. ábrával ellentétben – megfordítva működött, azaz a szétválasztandó közeg alul lépett be tangenciálisan kialakított furatokon keresztül a hengeres testbe, míg az elvezetések, mind a tangenciális kifolyás, mind az örvénykereső cső, felül helyezkedtek el. A 120° -ban kialakított három darab 10 mm átmérőjű furattal a bevezetett közegnek nagy perdületet lehetett biztosítani a 80 mm átmérőjű és 485 mm magas hengeres testben. Hasonlóan nagy perdületet a hagyományos hidrociklonokban csak külön perdületet fokozó betételekkel lehetett elérni.

4. Összefoglalás

A gáztisztító ciklonokkal szemben a hidrociklonok hazai elterjedése indokolatlanul kismérvű. A mellőzést nem indokolja sem a technológiai alkalmazhatóság sokrétűsége, legyen a műveleti cél akár a szuszpenziók szétválasztása, a szuszpendált szemcsék osztályozása, vagy akár az egymásban nem oldódó folyadékok, például az olaj-víz rendszerek szeparálása. Gyártástechnológiailag sem indokolt a mellőzés, mert a hidrociklon konstrukciója egyszerű, szinte bármilyen szerkezeti anyagból elkészíthető, ráadásul mozgó alkatrészeket sem tartalmaz.

A dolgozatban a hidrociklonok áramlási viszonyainak a rövid bemutatása mellett a szerzők figyelem felkeltési céllal felvázolták a fejlesztési tendenciákat, mind a folyadék-szilárd, mind a folyadék-folyadék rendszerű hidrociklonok területén, illetve ismertették a korszerű konstrukciók kialakításokat. Érdeemes megjegyezni, hogy a korábban előre jelzett tendenciáknak szinte az ellenkezője is megvalósult az utóbbi időkben. Például a kúpszög növelés helyett az egyre kisebb szög dominál, illetve megjelenik a két hengeres kialakítás.

A hidrociklonok egyre több területen való gazdaságos alkalmazhatóságát a legújabb publikációk igazolják, ezért indokolt lenne a hazai hidrociklonozás K+F munkájának a jelentős szélesítése.

Felhasznált irodalom

- [1] Svarovsky, L. – Thew, M. T.: *Hydrocyclones*, Dordrecht, Kluwer Acad. Publ. 1992.
- [2] Clayton, D. – Svarovsky, L. – Thew, M. T.: *Hydrocyclones'96*, London, Mech.Eng.Publ.Ltd.1996.
- [3] Fejes G. – Tarján G.: *Vegyipari gépek és műveletek*, Budapest, Tankönyvkiadó, 1979.
- [4] Horányi R. – Németh J.: *Investigation of the performance of a clarifier tube centrifuge*, Acta Chimica Sci. Hung., Tomus 71 (4), 1972, pp.427-444.
- [5] Kelsall, D. F.: *A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone*, Trans. Inst. Chem Engrs. Vol. 30, 1952, pp. 87-108.
- [6] Rietema, K.: *Performance and design of hydrocyclones, I-IV*. Chem. Eng. Sci. Vol. 15, 1961, pp. 298-325.
- [7] Lajos T.: *Az áramlástan alapjai*, Budapest, Műegyetem Kiadó, 2004, pp. 363-377.
- [8] Chen, W. – Zydek, N. – Parma, F.: *Evaluation of hydrocyclone models*, Chem. Eng. J. Vol. 80, 2000, pp.295-303.
- [9] Ko, J. – Zahrai, S. – Machion, O.: *Numerical modeling of highly swirling flows in a hydrocyclone*, AIChE Journal, Vol. 52, 2006, pp. 3334-3344.
- [10] Bergstöm, J. – Vomhoff, H.: *Experimental hydrocyclone flow field studies*,

Separation and Purification Technology, Vol.53, 2007, pp. 8-20.

- [11] Bradely, D.: *The Hydrocyclone*, Oxford, Pergamon Press, 1965.
- [12] Mainza, A. – Powell, M. S. – Knopjes, B.: *Differential classification of dense material in a three-product cyclone*, Mineral Engineering, Vol.17, 2004, pp. 573-579.
- [13] Ahmed, M. M. – Ibrahim, G. A. – Farghaly, M. G.: *Performance of a three-product hydrocyclone*, Int. J. of Mineral Process. Vol. 91, 2009, pp. 34-40.
- [14] Nenu, R. K. T. – Yoshida, H. – Fukui, K. – Yamamoto, T.: *Separation performance of submicron silica particles by electrical hydrocyclone*, Powder Techn. Vol. 196, 2009, pp. 147-156.
- [15] Delgadillo, J. A. – Rajamani, R. K.: *Exploration of hydrocyclone designs using CFD*, Int. J. of Mineral Process. Vol. 84, 2007, pp. 252-261.
- [16] Nageswararao, K. – Wieseman, D. M. – Napier-Munn, T. J.: *Two empirical hydrocyclone models revisited*, Minerals Engineering, Vol. 17. 2004, pp. 671-687.
- [17] Wang, B. – Yu, A. B.: *Numerical study of the gas-liquid-solid flow in hydrocyclones*, Chem. Eng. Journal, Vol. 135, 2008, pp. 33-42.
- [18] Bohnet, M.: *Trennen nicht mischbarer Flüssigkeiten*, Chem. Ing. Tech. Vol. 48, 1967, pp. 177-189.
- [19] Harms, G. – Bohnet, M.: *Trennen nicht mischbarer Flüssigkeiten in Hydrocyclon*, Chem. Ing. Tech. Vol. 8, 1996, pp. 558-562.
- [20] Wesson, G. D. – Petty, C. A.: *Process Engineering of Produced Water Treatment*, Proceedings of the Intern. Petroleum Environmental Conf. Houston, Texas, 1994, pp. 1-10.
- [21] www.aiche.confer.com/aiche/2009/pater159581.html (2010. szeptember)
- [22] Sóvágó Gy.: *Rézfotálás Rudabányán az 1970-es években*, Bányászattörténeti közlemények, 1. évf. 1. (1.) sz., 2006, pp. 37-54. (epa.oszk.hu/01400/01466/00001/pdf/)
- [23] Fern, K. A.: *The cyclone as a separating tool in mineral dressing*, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 30a, (1952), pp. 82-86.

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.2>

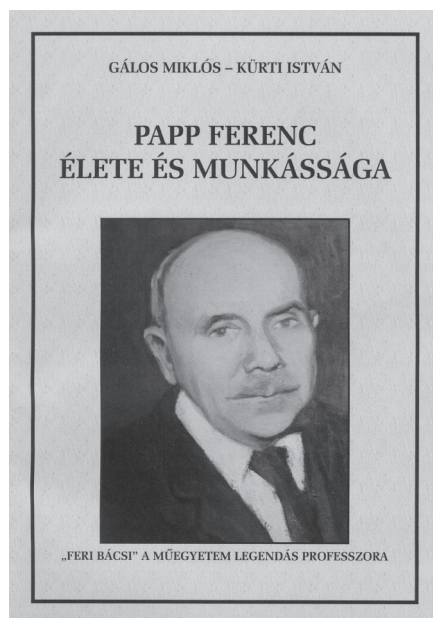
Németh Jenő – Verdes Sándor: *Készülékfejlesztés a hidrociklonozásban*.

Építőanyag, 64. évf. 1-2. szám (2012), 8-15. p.

KÖNYVAJÁNLÓ

Gálos Miklós – Kürti István

PAPP FERENC ÉLETE ÉS MUNKÁSSÁGA



Papp Ferenc születésének 110. évfordulójára **Gálos Miklós** és **Kürti István**, volt tanítványai, az SZTE Kő és Kavics Szakosztályának tagjai, emlékkötetet állítottak össze **Papp Ferenc élete és munkássága – „Feri bácsi” a műegyetem legendás professzora** címmel.

Papp Ferenc, Feri bácsi (1901–1969) szakmája odaadó, alkotó művelője, példás pedagógus szakmai közéleti vezető, nagy mecénás és mindenképpen felett nagyon jó ember volt. E könyv a Műegyetem neves professzorának – tanítványai, munkatársai, tisztelői, munkásságát folytató hidrogeológusok, mérnökgeológusok, barlangkutatók – már életében megbecsült Feri bácsijának állít emléket.

Budapesten született, a budapesti Pázmány Péter Tudományegyetemen szerzett tanári képesítést és bölcsészdoktori tudományos fokozatot. 1924-től haláláig a Műegyetemen oktatott és kutatott. 1956-ban védte meg a Magyar Tudományos Akadémián kandidátusi értekezését. 1960-tól az egyetem Ásvány- és Földtani Tanszék tanszékvezetője, 1960-61 években a Mérnöki Kar dékánja volt.

Oktatói munkájában első helyen a természet szeretére való nevelés állt. Rendszeresen vezetett geológiai kirándulásokat. Műszaki szemlélettel ismertette meg hallgatóival hazánk földtani érdekességeit. Szakirodalmi munkásságának legfontosabb részét a hidrológiával és mérnökgeológiával foglalkozó tanulmányok képezik. *Műszaki földtan* című könyve, melyet társszerzővel írt, máig az egyetlen mérnökgeológiával foglalkozó szakkönyvünk.

Kiterjedt szakmai-közéleti tevékenységet folytatott. Több tudományos szakegyesületben viselt magas tisztségeket: a Magyarhoni Földtani Társulat titkára, majd főtítkára, a Mérnökgeológiai Szakcsoport alapító elnöke, a Magyar Hidrológiai Társaság alapító tagja, majd elnöke; a Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat elnöke, tiszteleti tagja, az SZTE Kő és Kavics Szakosztályának megalapítója volt.

Az emlékkötet terjedelme több mint 150 oldal, részben színes képmellékletekkel.

Ára: 3000 Ft. Megvásárolható a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék titkárságán (1111 Bp., Műegyetem rkp. 3., K. ép., I. em. 85.).

Bányaföldtani tapasztalatok a komlói andezitbányában

KLESPITZ János

(1934) okleveles geológus (1956).

Munkahelyei: Jókai bánya, Alföldi Kőolajfúrási Üzem, AGROTERV, kutató ill. üzemi geológus (1956–1970). 1970-től a Kő és Kavicsipari Egyesülésben földtani szolgálat vezető. Kiváló ifjú mérnök (1969). „A földtani kutatás kiváló dolgozója” (1976), a Magyar Népköztársaság által „Kiváló Munkáért” kitüntetésben részesült (1985), az Eötvös Loránd Tudományegyetem Tanácsa által aranyoklevél adományozásában részesült (2007), a Szilikátipari Tudományos Egyesület örökös tagja. Publikációinak száma mintegy 50.

KLESPITZ JÁNOS • okl. geológus

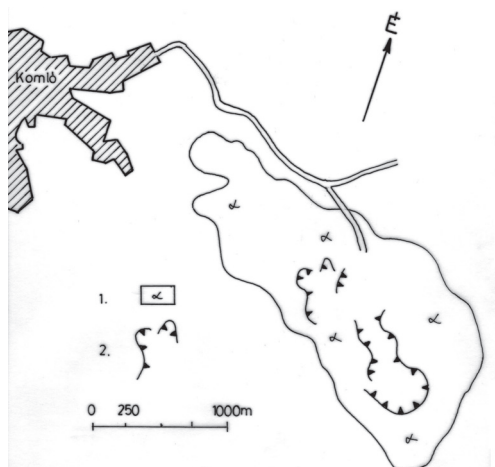
Érkezett: 2012.01.10. • Received: 10.01.2012. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.3>

Quarry-geological observations in the Komló andesite-pit

This paper describes the mining geological conditions of andesite-pit southeast of Komló in the central part of Mecsek Mountain on the basis of observations of the material, settlement mechanism, quality and the sterile mass of andesite in exploitation.

The author interprets the rock weathering and degradation processes of different extent due to subsurface erosion, and post-vulcanic exhalation and solution migration in the deeper zones, respectively. From factors affecting the mining the varying degrees of tectonic fragmentation (faults, joints), the rise caused by surface depression of coal undermining and the hydrogeological status of andesite-pit are discussed.

A komlói andezitbánya a Mecsek hegység centrális részén, Komló város délkeleti előterében található (1. ábra).



1. ábra Vázlatos helyszínrajz és az andezit elterjedése a bányáuzem térségében.
1 - spread of Mecsek Andesite Formation in the area of Komló andesite-pit
2 - andesite-pit of Komló

Fig. 1. Site plan and spread of andesite in the area of the pit.
1 - spread of Mecsek Andesite Formation in the area of Komló andesite-pit
2 - andesite-pit of Komló

A bányáuzem a Mecsek hegység centrális részét alkotó Hármashükk, Kövestető, Hármashegy 500-600 mBf. magasságú vonulatának északnyugat felé lejtő, immár alacsonyabb magasságú területén a Somoskő–Macskalik térségben helyezkedik el.

A bányaterület felszínének tengerszintfeletti magassága 250–381 mBf. északról dél, délkelet felé – a Mecsek hegység gerincvonulata irányába – mutat emelkedő tendenciát. A bányatelek legmagasabb pontja a nyugati területrészen emelkedő Somos-tető: 381,6 mBf.

A komlói bányatelek felszíni morfológiájára az ÉNy–DK-i lefutású fő, és az azokból kiágazó mellékvölgyek jellemzőek, melyek irányai megegyeznek a bányaművelés által feltárt tektonikai fő és melléktörésekkel.

A zúzottkővet előállító bányáuzem haszonkőve a kainozóikum, miocén kori helvétii emeletében képződött amfibolandezit, a jelenlegi földtani nomenklatura alapján a Mecsek Andezit Formáció.

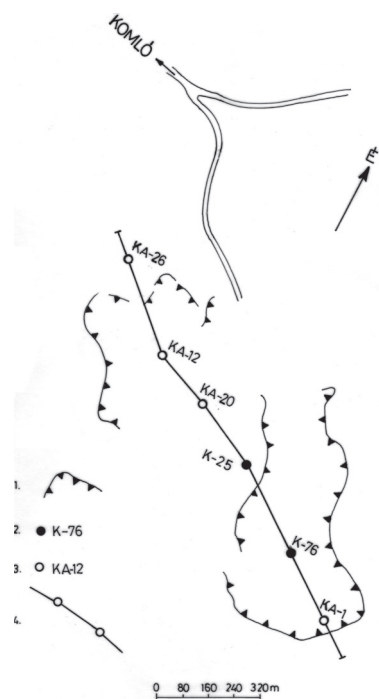
A kitermelés alatt álló andezitet a Magyar Állami Földtani Intézet térképfelvételei, a korábbi kőszénkutató fúrások, a több fázisban kivitelezett kőipari földtani kutatások és a kőbányászati tevékenység alapján ismerjük.

A kőszénkutató fúrások a kőszén fedőjében levő andezitet csak teljes szelvényű fúrási technológiával harántolták át. A kőipari ásványi nyersanyagkutatások esetében végig – a tervezett vertikális szintig – magfúrásokkal történt az andezit feltárása.

Az andezitről a legrészletesebb kőbányászati és bányaföldtani ismereteket a kőkitermelés nyitott bányafalai (2009. I. 1-jén mintegy 5500 m volt a bányafal összes hossza) szolgáltatják, illetve szolgáltatják. A művelés alatt álló bányafalak előrehaladásuk eredményeként szeletenként teszik tanulmányozhatóvá az amfibolandezit anyagát, minőségét, megjelenési módját és meddőviszonyait.



2. ábra Az új bánya dél felől
Fig 2. The new pit from the south



3. ábra A komlói andezitbánya helyszínrajza a földtani szelvény nyomvonalával.

- 1 - a legfelső szint bányafalának kontúrja
- 2 - kőszénkutató fúrás
- 3 - andezitkutató fúrás
- 4 - a földtani szelvény nyomvonal

Fig. 3. Scheme of Komló andesite-pit with geological section track.

- 1 - top level outline of the mine wall
- 2 - coal prospect boring
- 3 - andesite prospect boring
- 4 - geological section track

A komlói andezit előfordulás ÉNy–DK irányú hosszanti és keresztirányú kiterjedése 3000, illetve 750–1100 m. Az andezit vastagsága a DK-i részen (a régi bánya térsége) eléri a 270 métert, északnyugat felé (az új bánya területe) kivékonyodik. Az új bánya területén a KA-12, KA-13 és a K-115 fúrás térségében

a vulkanit vastagsága 160 m, a bányatelek É-i határánál már csak 40 m.

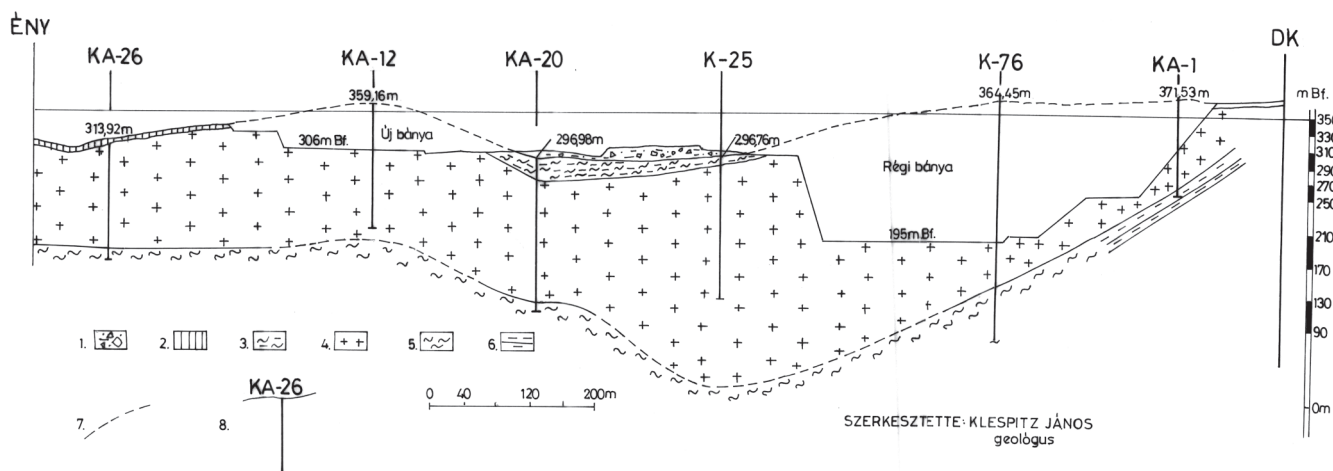
Az andezit feltörési helye (a kürtő) a régi bánya területe alatt található. A többszintes andezitkitermelés eredményeként a régi bánya legmélyebb pontja 194 m, az új bánya mélyszintjének udvarszintje 284 mBf. Az andezit kitermelése immár dominálón az új bányában folyatódik, melynek eredményeként az üzemterület vertikális kiterjedése fokozatosan bővül (2. ábra).

A bányaművelési terület földtani felépítésében a kizozikum, miocén kor helvét emeletében képződött haszonkő, a Mecsek Andezit Formáció fekként dominálón jura, liász színemuri mészmárga, a déli részen agyagkő mutatkozik (3. és 4. ábra). Az andezit fölött előfordul közép-miocén agyagmárga, de a bányaterület nagyobb részén a nem jelentős vastagságú pleisztocén-holocén agyag, lejtőtörmelék és humuszos lejtőtörmelék agyag képezi a letakarítandó fedő meddőt. A bányatelek jelentős részén feltöltés és a korábbi bányaművelésből származó meddő anyag (meddőhányók) is található a haszonkő felett.

A komlói amfibolandezit eredeti állapotában (a későbbi elváltozásoktól még mentesen) sötétszürke, üde, tömött szövetű, kemény, kagylós törésű, kiváló minőségű kőzet. Fő ásványos alkotói a plagioklász földpátok (albit, anortit), amfibol, piroxén. A vulkáni kőzetek rendszere alapján az andezit SiO_2 tartalma 57%, ami nem szabad kvarcként, hanem a szilikátásványok alkotórészeiként van jelen a kőzetben.

Mikroszkóp alatt az andezit folyásos szövete is tapasztalható.

A Budapesti Műszaki Egyetem, Mérnökgeológiai Tanszék Mikro-Deval aprózódás vizes eljárás vizsgálati eredmények alapján a komlói andezit AA általános csoportú. Az elvégzett laboratóriumi kőzetfizikai vizsgálatok alapján az amfibolandezit AA minőségű. A vulkanit térfogatsúlya $2,62 \text{ g/cm}^3$, fajsúlya: $2,69 \text{ g/cm}^3$, nyomószilárdsága a földtani kutatás vizsgálati alapján: $1286\text{--}2514 \text{ kp/cm}^2$.



4. ábra A komlói andezitbánya ÉNy–DK irányú földtani szelvénye

- 1 - feltöltés
- 2 - agyag, lejtőtörmelék, humusz. Pleisztocén, holocén
- 3 - agyagmárga. Miocén, kárpáti
- 4 - amfibolandezit (Mecsek Andezit Formáció). Miocén
- 5 - mészmárga. Liász, színemuri
- 6 - agyagkő. Liász, színemuri
- 7 - a terület bányaművelés előtti felszíne
- 8 - kutatófúrás

Fig. 4. NW-SE geological section of Komló andesite-pit

- 1 - filling
- 2 - clay, slope detritus, humus. Pleistocene, Holocene
- 3 - clay marl. Miocene, kárpáti
- 4 - amfibolandezite (Mecsek Andesite Formation). Miocene
- 5 - lime marl. Lias, színemuri
- 6 - clay rock. Lias, színemuri
- 7 - surface of the area before mining
- 8 - prospect boring

A komlói andezit réteges, pados, cserepes elválású. Az andezit ezen megjelenési módjai, elválásai a láva lehűlésével járó térfogatcsökkenés eredménye. A kihülési elválások merőlegesek a kihülés irányára, melynek következtében az elválási síkok párhuzamosak a fekvő vagy a korábbi lávaömlés már megszilárdult felületeivel.

A bányauzemben a réteges, cserepes elválású andezit a felső bányaművelési szinteken gyakoribb (5. ábra). Mélyebben, az andezittömeg alsó zónájában inkább a vastagpados kihülési elválás dominál (6. ábra).



5. ábra Réteges, cserepes elválású andezit az új bánya 327 mBf. szint, Ny-i bányafalán
Fig. 5. Layered andesite at 327 meters above Baltic Sea level on the western mine wall of new mine



6. ábra Pados elválású andezit az új bánya 306 mBf. szint, É-i bányafalán
Fig. 6. Benching andesite at 306 meters above Baltic Sea level on the northern mine wall of new mine

A bányaföldtani megfigyelések alapján esetenként a réteges, cserepes és pados elválás egy bányaművelési szint kőzetfalán egymás mellett is előfordul.

Kőzetminőség tekintetében a vastagpados megjelenésű andezit a legkedvezőbb.

Az andezit megjelenési módjának tekintetében alapvető tényezők a tektonikai mozgások hatására létrejött törések, kőzetrések.

A bányaműveléssel feltárt fő törésirány az ÉNy-DK-i és az erre közel merőleges az ÉK-DNy-i irányú haránttörések.

A komlói andezitben a tektonikai mozgások okozta töréseket kísérő kőzetrések változó mértékű töredezettséget idéztek elő. A bányafalakon a törésekkel megegyező irányú, közel függőleges kőzetrések gyakorisága területenként változó. Helyenként 10, máshol 100 cm-ként mutatkoznak. A törésvonalak és nagyobb vetők közelében a kőzetreses töredezettség fokozottabb mértékű.

Az andezitben lokálisan előforduló fokozott mértékű töredezettséget már a fúrásos ipari földtani kutatás folyamán is tapasztaltuk. A KA-12-es kutató magfúrás, a vulkanit erős töredezettsége miatt beomlott, „elszerencsétlenedett” és a további

mélyítése nem volt lehetséges. Helyette a KA-12/a fúrással folytattuk az andezit kutatását.

A kihülési elválások és a kőzetrések gyakorisága együttesen határozzák meg a letermelt kőzet tömbös vagy töredezett megjelenését. A tapasztalatok alapján a tömbösebb termék a mélyebb szinteken, a markáns törésektől távolabb fordul elő.

A nagyobb törések és a kísérő vetők, kőzetrések együttes hatásaként a fő törések mentén meggyengül az andezit kohéziója, ezért ezen falszakaszokon az omlásveszély miatt a bányaművelésekor fokozott óvatossággal kell eljárni. Növeli a veszélyt, ha a törési síkok párhuzamosak a bányafallal, vagy ha a vetőlap dőlése a bányaudvar felé mutat (7. ábra).



7. ábra A bányaudvar irányába lejtő törési sík az új bánya 306 mBf. szint, É-i bányafalán
Fig. 7. Fracture plane sloping towards the mine yard at 306 meters above Baltic Sea level on the northern mine wall

A markánsabb törések és kisebb vetők lehetőséget adtak az utóvulkáni gőzök, gázok feláramlásának és ennek következtében az andezit változó mértékű átalakulásának végső esetben elagyagosodásának. A lokálisan mutatkozó endogén elváltozások következményeként az andezit elbontódása változó mértékű, az enyhén vörös még hasznosítható típustól a barnásszürke elmállott, földes megjelenésű, meddőnek minősülő agyagos előfordulásig. A régi bánya 255 m-es bányaművelési szintjén a nyugati bányafalon függőleges törések kőzetrések mentén 1–2 m szélességben vörös oxiandezit mutatkozott. Ugyanitt a 300 és 252 m-es szint DNy-i részén a vörös és barna változóan bontott andezit tömszós megjelenésű, ami a D-i irányba előrehaladó bányafal síkjában, hosszú ideig több 10 m horizontális és vertikális kiterjedésben képezett belső meddőt az andezitben.

Az új bánya U5-ös szintjén (285 mBf.) kisebb törések és kőzetrések mentén áramló utóvulkáni oldatok az andezitben sárgásbarna elszíneződésű, változó mértékű elbontódást okoztak (8. ábra). Mivel a különböző mértékben elbontott kőzet a bányafal össztömegéhez viszonyítva jelentéktelen mértékű, a belső meddő a kitermelt bányatermék minősége vonatkozásában itt nem meghatározó tényező.

Az andezit felső szintjére – a felszín közelében 10–15 m-ig – a külső erők (erózió) változó hatást gyakoroltak.

Korábban a régi bánya legfelső szintjéről (337 mBf.), az erős felszíni eredetű elbontódás miatt a kitermelt andezit jelentős részét a meddőhányóra kellett szállítani.



8. ábra Törések, kőzetrések mentén áramló oldatok hatására átalakult, elbomlott andezit az új bánya 285 mBf. szint, Ny-i bányafalán

Fig. 8. Andesite transformed, decomposed under solutions flowing along faults and rock gaps at 285 meters above Baltic Sea level on the western mine wall

A bányaföldtani megfigyelések alapján a törései zónákban a fokozottabb mértékű beszivárgás következtében erősebb az erózió kőzetmállasztó hatása.

Az új bánya legfelső szintjének (345 mBf.) délnyugati, hosszú ideig művelésileg szüneteltetett falánál feltárult törési zónában a töredezettség és a kőzetbontódás következtében erős kőpergés és kisebb-nagyobb mállott, agyagos andezittömbök leomlása is előfordult (9. ábra).



9. ábra Törési zónában mutatkozó erős kőpergés és omlás az új bánya 345 mBf. szint, Ny-i bányafalán

Fig. 9. Strong rock whirling and sliding shown in fault zone at 345 meters above Baltic Sea level on the western mine wall

Helyenként a felszínig húzódó andezithasadékokban a felszínről lemosódó agyag, és andezittörmelékes agyag is növeli a felső szintű bányatermék meddő tartalmát.

Az új bánya nyugati részén a felső szintű fal (348 mBf.) felszín közeli szakasza bontott vörös andezitet tárt fel. A sötét andezitben a vörös bontott kőzet zóna egyenetlen, hullámos felület mentén, helyenként 7–8 m-ig is lehúzódik a bányafalon.

A kőbányászati tapasztalatok és a bányaföldtani megfigyelések alapján megállapítható, hogy a felső szint jelentős bontottsága ellenére az új bánya legfelsőbb szintjének kevésbé töredezett, az erózió által kisebb mértékben elbontott falszakaszain az andezit, zúzottkő előállítás tekintetében nem minősül mindenhol alkalmatlannak.

A komlói andezitbányában a belső meddő okozta, termelés közben előálló veszteség legnagyobb az andezit felső, az erózió által erősen igénybevett részén, vagyis a legfelső szint művelésekor. A mélység irányába haladva – ahol a kőzetminőség romlása az endogén erők következtében csak kisebb mértékű – a veszteség javuló tendenciát mutat.

Egyéb bányaművelést befolyásoló tényezőnek tekinthetők a régi bányánál szénbányászati aláfajtás következtében fellépő felszakadások. A bánya déli fala előtt, a kőbányával még nem művelt területen 1972-ben az egyik felszíni felszakadás hossza 30–40 m, a nyílás szélessége 1–2 m, mélysége elérte a 20–30 m-t.

Az andezit fedőjét képező pleisztocén, holocén agyag, lejtőtörmelék és humuszos agyag vastagsága az új bányaterületen a kutatófúrások feltárásai és a bányászati tapasztalatok alapján 1–5 m. A morfológiai mélyebb területrészekben – a völgyekben – az összemosódás miatt vastagabb fedő üledékekkel és alatta az andezitban – a fokozott mértékű csapadékeszivárgás miatt – mélyebbre ható mállott zónával kell számolni. Vastagabb lefedendő üledék a régi és új bánya közötti területen mutatkozik, ahol a fedő kőzetanyagát a bányáeredetű feltöltés és miocén agyagmárga képezi. Itt a miocén agyagmárga vastagsága a földtani szelvényben levő K-20-as fúrásban közel 25 m (4. ábra).

Az andezit töréshálózatában a jelentős vízgyűjtőterületből is adódóan tetemes tömegű beszivárgó csapadékvíz tud tárolni. Tekintettel a régi bánya jelentős felszín alatti mélységére (4. ábra) a legalsó szinten a kő kitermelése csak víztelenítő szivattyú kapacitás üzemeltetése mellett lehetséges.

Az 1981-es évben a kőipari földtani szolgálat által kivitelezett üzemi porfúrásos andezit-kutatás folyamán a régi bánya 255 mBf. udvarszintjéről mélyített fúrásokkal nyomás alatti vízszintet tártunk fel. A vízszint elérésekor a fúrásokból a víz rövid ideig szökőkútként tört a bányaudvar szintjére.

Az andezit hasadékaiban a csapadék függvényében változó szintig feltöltődő, tározódó víz a külszíni bányaműveléssel, annak mélyülése folyamán, fokozódó mértékben folyamatosan csapolódik.

A komlói bányüzem több évtizedes művelése eredményeként a miocén kori vulkanit maximálisan mintegy 165 m vastagságban nyert feltárást.

Az andezitterületen rendelkezésre álló, zúzottkő előállítására alkalmas haszonkő még hosszú ideig biztosítani tudja a bányüzem működését, ami lehetővé teszi a Mecsek Andezit Formáció földtani, illetve bányaföldtani felépítésének további, a kőbányászat számára is hasznosuló, folyamatos vizsgálatát és még részletesebb megismerését.

Felhasznált irodalom

- [1] Badinszky P.: *Az építő- és építőanyagipari ásványi nyersanyag kutatásainak iparági célkitűzései*. Szilikástechnika, 1981. 4-5. 92.
- [2] Klespitz J.: *Bányageológiai megfigyelések az állami kőbányaipar andezitbányáiban*. Építőanyag KLI. évf. 1989. 1. sz. 9-11. o.
- [3] Klespitz J.: *A kőbányászati Egyesülés bányáinak fekvés és belsőmeddő viszonyai*. Szilikástechnika, 1976. 2. szám. 39-44. o.
- [4] Klespitz J.: *Bányaföldtani tapasztalatok a kőbányaiparban*. Földtani Kutatás XXV. évf. 1982. 3-4. sz. 42-45. o.
- [5] MÁFI: *Magyarország földtani atlasza M=1.200 000*. Magyar Állami Földtani Intézet 2009.
- [6] Némedi Varga Z.: *A Mecsek hegységi andezit vulkánosság*. Földtani Közlöny, 1967. 4. 396-413. o.
- [7] Vadász E.: *Magyarország földtana*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1960.
- [8] Vitális Gy.: *Szilikátipari nyersanyagok. Szilikátipari-építőanyagipar*. 3. ÉTK, Budapest, 1984. 1-207. o.

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.3>

Klespitz János: *Bányaföldtani tapasztalatok a komlói andezitbányában*. Építőanyag, 64. évf. 1-2. szám (2012), 18–21. p.

Szilikapor hatása a beton tűzállóságára

CZOBOLY OLIVÉR • BME • czobolyoli@gmail.com

HARMAN BÉLA • BME • hbela3@gmail.com

LUBLÓY ÉVA • BME • lubeva@web.de

BALÁZS L. GYÖRGY • BME • balazs@vbt.bme.hu

NEHME SALEM GEORGES • BME • sgnahme@yahoo.com

Érkezett: 2011. 12. 19. • Received: 19. 12. 2011. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.4>

Concrete with silica fume in fire

In case of HPC the application of silica fume is often necessary. Behaviour of concrete with silica fume at high temperatures is different from that of conventional concrete.

As a part of our study, experiments were carried out in order to observe the behaviour of concrete specimens exposed to fire. During the experiments both the residual compressive strength and residual flexural strength of the specimens were determined after being exposed to high temperature. Parameters of the experiment were the following: silica fume content (0 m_c%, 3 m_c%, 9 m_c%), cement content (400 kg/m³; 436 kg/m³), water-cement ratio (w/c = 0,35; 0,36; 0,38), water-binder ratio (w/b = 0,35; 0,33; 0,30), maximum temperature (20 °C; 50 °C; 150 °C; 300 °C; 500 °C; 1000 °C). Results in case of constant w/c ratio and constant cement content: increasing the amount of silica fume is unfavourable for the relative residual compressive strength. The relative residual flexural strength also changes disadvantageously in case of lower temperature exposure (20–150 °C) and increased silica fume content. In case of higher temperature exposure (more than 150 °C) addition of 3 m_c% silica fume to the mixture proved to be advantageous. Results in case of constant water-binder ratio: if silica fume is added, while water-binder ratio is kept constant (mixtures M6 and M4) the relative residual compressive strength does not change considerably but the relative residual flexural strength increases. In case of 9 m_c% silica fume content lower w/c ratio increases the initial compressive strength, on the other hand decreases the relative residual compressive strength after elevated temperature exposure. If the silica fume content is 9 m_c%, the relative residual flexural strength is not affected by the different w/c ratios. The experiments also proved that the addition of silica fume to a concrete mixture decreases the risk of spalling, consequently increases the fire resistance.

Keywords: fire safety, silica fume, residual strength, HPC

Kulcsszavak: tűzállóság, szilikapor, maradó szilárdság, nagy szilárdságú beton

1. Bevezetés

A fokozódó mérnöki kihívásokkal a beton tulajdonságai is folyamatosan változnak. Az egyik fejlődési irányt a szilárdságnövelés jelenti. Ezt jól szemlélteti az is, hogy a nemrég hazánkban visszavont MSZ 4719:1982 szabványban szereplő legnagyobb nyomószilárdsági osztály a C55 (C55/67) volt, tehát a mai szokásos terminológia szerint az MSZ 4719:1982 szabványban nem esett szó nagyszilárdságú betonról. Az ezt felváltó MSZ EN 206-1:2002 szabvány szerint nagyszilárdságú betonnak nevezzük, a C55/67 – C100/115 nyomószilárdsági osztályú közönséges betonokat, a HC55/67 – HC100/115 nehézbetonokat, illetve az LC55/60 – LC80/88 könnyűbetonokat.

Egyes szakirodalmak szerint „nagyszilárdságú betont C70/85 nyomószilárdsági osztály felett szilikapor nélkül készíteni általában nem lehet” [1]. Az előző állítást igazolja Held 1991-ben megjelent publikációja [2] is, melyben ismertet 3 beton receptúrát, melyekről azt írja, hogy „a nagyszilárdságú beton tipikus receptjei”. Az általa közölt három receptúra mindegyike tartalmaz szilikaport (kovasavlisztet).

Szerte a világban lehet találni olyan megépült szerkezeteket, ahol szilikaport alkalmaztak a betonhoz. Szilikaport használtak a Toronto városban (Kanadában) épült Scotia Plazánál (1. ábra), a chicagói „South Wacker Drive 311” magasháznál, a „Taipei 101” felhőkarcolónál (Tajvanban) (2. ábra) [4]. További

CZOBOLY Olivér Attila

(1988) építőmérnök hallgató (BME Építőmérnöki kar). TDK Építőanyagok és magasépítés szekció I helyezett, OTDK különdíj. Fő érdeklődési terület: Beton és fa tűzállóság, nagyszilárdságú betonok. A fib Magyar Tagozat és az ÉTE tagja. ÉTE-BME Hallgatói Szakosztály Építőmérnök Tagozat vezetője.

HARMAN Béla András

(1988) építőmérnök hallgató (BME Építőmérnöki kar). TDK Építőanyagok és magasépítés szekció I helyezett, OTDK különdíj. Fő érdeklődési terület: Beton és fa tűzállóság, nagyszilárdságú betonok.

Dr. LUBLÓY Éva

(1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki kar 2002), adjunktus a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken (2002). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A fib Magyar Tagozat tagja.

Dr. BALÁZS L. György

Okl. építőmérnök, okl. matematikai szakmérnök, PhD, Dr. habil. egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék vezetője. Fő érdeklődési területei: beton, vasbeton és feszített szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), szálerősítésű betonok, nem acél anyagú betétek megerősítések anyagai és módjai, erőtáradódás a betonban, vasbeton tartó repedezettségi állapota, vasbeton szerkezetek tartóssága. A fib Magyar Tagozat elnöke, A fib nemzetközi szervezetének elnöke 2011-2012-ben.

Dr. NEHME G. Salem

(1963) okl. építőmérnök (1992) vasbetonépítési szakmérnök (1996) egyetemi docens a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken. Fő érdeklődési területei: bentotechnológia, beton porozítása, tömegbetonok vizsgálatai és problémáinak szakértése, öntömörödő beton, szálerősítésű betonok, építőanyagok minőségellenőrzése, beton roncsolásmentes vizsgálata és minősítése, vasbeton szerkezetek szakértése, újrahasznosított adalékanyagokból készült beton. A fib Magyar Tagozat tagja.

példaként említhető a szilikapor alkalmazására a 2004-ben átadott W-Comfort torony Tokióban, vagy a 2010-ben átadott Burj Dubaj (Dubaj torony). Kedvező tulajdonságai miatt a lőttbeton technológiánál is adagolnak szilikaport a betonhoz [6].

2. Szilikaporról röviden

A szilikapor fogalmát az Amerikai Beton Intézet (ACI) a következőképpen definiálja [7]: „nagyon finom, amorf szilika, ami elemi szilícium, vagy szilícium tartalmú ötvözetek gyártásának melléktermékeként keletkezik, elektromos ívű kohóban. Tulajdonképpen a kvarc (SiO₂) és a szén (C) elektromos ívben történő reakciójakor jön létre a szilikapor. A betonba kevert szilikapor a többi alkotóval reakcióba lép”. Egy másik tanulmány alapján [8]: „A szilikapor szemcsék átgélesednek és könnyen behatolnak a pórusokba, és ott a cement hidratációja következtében keletkező kalcium-hidroxid oldattal [Ca(OH)₂], amely nem járul hozzá a beton szilárdságfejlődéséhez kalcium-szilikát-hidrátot (CSH) képeznek, amely a beton tömörségét és szilárdságát jelentősen megnöveli” [8].



1. ábra Scotia Pláza [3]
Fig. 1. Scotia Plaza [3]



2. ábra Taipei 101 [5]
Fig. 2. Taipei 101 [5]

A szilikapor betonhoz adagolt mind a friss beton, mind a megszilárdult beton tulajdonságait javítja. A friss betonban növeli a kohéziót a szilikapor, így kevésbé osztályozódik szét a beton, csökken a visszahullás veszélye a lőttbetonok esetén [7]. A szilikapor alkalmazása növeli a megszilárdult beton nyomószilárdságát, rugalmassági modulusát és a hajlító-húzószilárdságát. Így főként nagy terhelésű oszlopoknál (felhőkarcolók esetén), illetve hídgerendáknál érdemes szilikaport alkalmazni. Emellett a szilikapor tartalom növeli a beton tömörségét, melynek köszönhetően az ionok behatolásával szemben nagyobb lesz az ellenálló képessége a betonnak (szulfátállóságot és kloridállóságot javítja).

A szilikapor reakciós folyamata miatt a keverékben a cement tömegére vonatkoztatva 0,11 m³% szilikaport lehet használni. A szilikaport be kell számítani kötőanyagként a receptúrába. A kötőanyagba való beszámítását egy *k* tényezővel kell kifejezni. Az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerint a *k* értéke CEM I cementfajtát tartalmazó betonoknál általános esetben a szilikaporra 2,0 [9].

3. Tűzállóság jelentősége

Az elmúlt évtizedekben számos épület- és alagúttűz történt. Ezek közül csak néhány nagyobb került be a köztudatba.

Magyarországon 2000 és 2005 között évi átlagban 24 000-nél is több tüzesetet regisztráltak. Ebből 6300-nál több a lakóingatlanokban bekövetkezett tűz [10].

Nem csak épületeket veszélyeztethet a tűz. A Gotthard alagútban 2001. október 24-én következett be tűz [11]. Az alagút tüzek mindig speciálisak, hisz ott viszonylag gyorsan, magas hőmérséklet alakul ki. Ezekben az esetekben gyakori tönkremeneteli mód a beton felület réteges leválása (3. ábra).

Sok példát lehet említeni olajfűrótoronyokon bekövetkezett kisebb-nagyobb tüzesetekre is. 2010 áprilisában volt tüzeset a Mexikói-öbölben az egyik olajfűrótoronyon (4. ábra). A tűz következtében elsüllyedt a fűrótorony, mely jelentős környezeti károkat okozott.



3. ábra Gotthard alagút betonfelületének réteges leválása [10]
Fig. 3. Gotthard tunnel was spalling in the fire [10]

A szakirodalmi adatok szerint a nagyszilárdságú betonoknak rosszabb lehet a tűzállósága, mint a szokványos betonoknak [13]. Ezért fontosnak tartottuk, hogy foglalkozunk a betonhoz adagolt szilikapor tartalom hatásával a tűzállóságára.



4. ábra Tüzeset a fűrótoronyon [12]
Fig. 4. Fire on an oil rig [12]

4. Kísérleti paraméterek

Vizsgálataink célja a szilikapor tartalom tűzállóságra gyakorolt hatásának kísérleti meghatározása volt a nagyszilárdságú betonok hőterhelés utáni maradó szilárdságára (maradó nyomószilárdság és maradó hajlító-húzószilárdság). A maradó nyomószilárdságot 50 mm átmérőjű és 100 mm magasságú hengereken, míg a maradó hajlító-húzószilárdságot 70×70×250 mm nagyságú hasábokon vizsgáltuk.

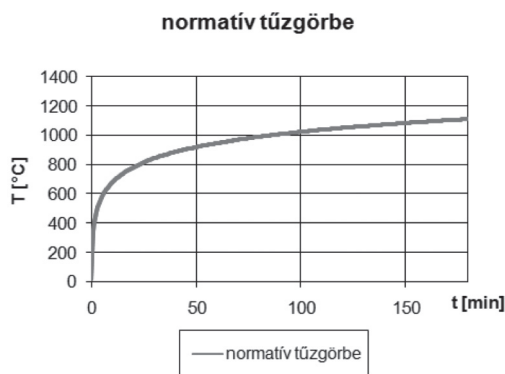
Hat féle beton keverék felhasználásával kapott kísérleti eredményeinket három csoportosítás szerint hasonlítottuk össze:

- Első esetben a szilikapor tartalom változásának hatását vizsgáltuk azonos víz-cement tényező esetén. (M1, M2 és M3 keverékek eredményeinek összevetése.)
- Második esetben a felhasznált szilikapor tartalmat és a felhasznált víz mennyiségét változtattuk azonos kötőanyag tartalom esetén. (M3, M4 és M6 keverékek eredményeinek összevetése.)
- Harmadik esetben azonos mennyiségű szilikaport, illetve cement tartalmat használtunk fel az összehasonlított keverékekben, miközben a víz mennyiségét változtattuk. (M2 és M5 keverékek eredményeinek összevetése.)

A maximális hőterhelési értékek megválasztásakor figyelembe vettük a Baranya Megyei Katasztrófavédelmi Igazgatóság

tájékoztatót, miszerint a tűzoltóknak a bejelentést követően 120 másodpercen belül el kell indulniuk a tűzesethez. Ha nehezen megközelíthető a tűzfészek, akkor előfordulhat, hogy mire szakszerűen el tudják kezdeni a tűz oltását, akár 30–40 perc is eltelhet a tűzeset bejelentésétől.

A tervezés és méretezés során a hőmérsékleti hatásokat normatív hőmérséklet-idő görbékkel lehet megadni. A magasépítési szerkezeteknél a normatív tűzgörbét kell alkalmazni (5. ábra).



5. ábra Normatív tűzgörbe
Fig. 5. Normative curve of fire

A témában talált kutatások nagy többsége 600 °C-ig vizsgálta a nagyszilárdságú betont, melyet a normatív tűzgörbe alapján kevesebb, mint 6 perc alatt elér a szerkezet. Így fontosnak tartottuk, hogy vizsgálatainkat 1000 °C-os maximális hőterhelési értékig végezzük, melyet 40 perc után ér el a szerkezet.

A vizsgálatainkat minden keveréknél 6 maximális hőterhelési értéken (20 °C, 50 °C, 150 °C, 300 °C, 500 °C és 1000 °C) végeztük.

5. Kísérleti eredményeink

A szilikapor tartalomtól függően egyes elemeknél a beton felület réteges leválását, illetve robbanásszerű tönkremenetelét figyeltük meg az 1000 °C-os hőterhelést követően. A henger alakú próbatestek épek maradtak, míg a hasáb alakú próbatestek közül közel a fele felrobbant (6. ábra). Ez a jelenség egyszerűen az ún. alakhatással magyarázható.

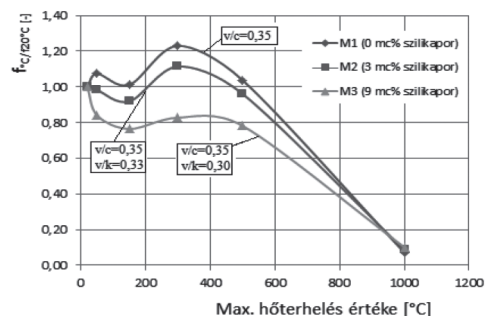


6. ábra A próbatestek az 1000 °C-os hőterhelés után
Fig. 6. Specimens after 1000 °C temperature loading

A hasáb alakú próbatestek közül a szilikaport nem tartalmazó (etalon) keverékekből készült próbatestek mind felrobbantak, majd a szilikapor tartalom növelésével az épen maradt próbatestek száma nőtt.

5.1. Beton próbatestek maradó nyomószilárdsága

Az első szempont alapján az azonos, 0,35-ös víz-cement tényezőjű (M1; M2 és M3) keverékek vizsgálata során a szilikapor tartalmat változtattuk. Minden keverékből, minden maximális hőterhelési értéken 3–3 próbateset vizsgáltunk és azok maradó nyomószilárdság értékeit átlagoltuk (1. táblázat). Ezt követően grafikonon ábrázoltuk a relatív maradó nyomószilárdság értékeit. Megállapítottuk, hogy a szilikapor tartalom növelésével a relatív maradó nyomószilárdság értéke az 50 °C, 150 °C, 300 °C és az 500 °C hőterhelést követően csökkent (7. ábra). 1000 °C-os hőterhelés után a mért relatív maradó nyomószilárdsági értékek jelentősen nem tértek el egymástól – az azonos v/c tényezővel készült, henger alakú próbatestek esetén.



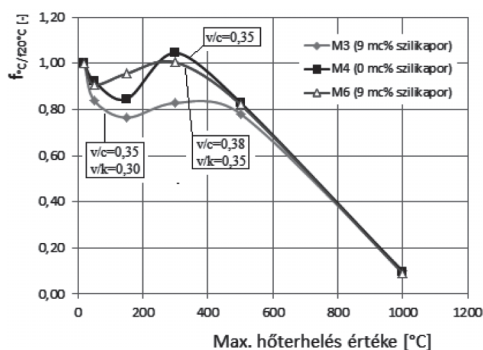
7. ábra Azonos v/c tényezőjű keverékek maradó relatív nyomószilárdság átlagértékei
Fig. 7. Relative residual compressive strength with constant w/c ratio

A mért nyomószilárdságok átlaga (N/mm ²)						
T (°C)	M1 (0 mc%)	M2 (3 mc%)	M3 (9 mc%)	M4 (0 mc%)	M5 (3 mc%)	M6 (9 mc%)
20	57,4	68,0	72,9	55,8	72,8	61,0
50	61,6	66,8	61,2	51,5	59,5	55,3
150	58,1	62,5	55,7	47,1	57,9	58,2
300	70,6	75,7	60,3	58,3	63,0	61,3
500	59,5	65,3	57,0	46,3	64,0	50,2
1000	4,2	5,9	7,4	5,4	8,7	5,5

1. táblázat Beton próbatestek maradó nyomószilárdság átlagértékei
Table 1. The residual compressive strength of the concrete specimens

A második szempont alapján az azonos kötőanyag tartalmú három (M3-as, M4-es és M6-os) keveréket hasonlítottuk össze (8. ábra). Az M4-es keveréknél a teljes kötőanyag mennyiséget cement formájában adtuk a betonhoz. Az M3-as és M6-os keverékeknél 36 kg/m³ (9 mc%) szilikaport és 400 kg/m³ cementet adagoltunk a keverékhez. Az M4-es és az M6-os keverékek víztartalma azonos volt. Megállapítottuk, hogy a cement egy részének szilikaporról való kicserélése a maradó nyomószilárdság szempontjából jelentősen nem változtatta a relatív maradó nyomószilárdsági értékeket (M6, M4) a 300 °C-nál magasabb maximális hőterhelés esetén. Az M3-as és az M6-os keverékek esetén a v/c és a v/k is változott, de azonos volt a szilikapor tartalom. Megállapítottuk, hogy 9 mc% szilikapor adagolás mellett a nagyobb v/c és v/k értékű (M6-os) keverék bizonyult kedvezőnek a hőterhelés utáni relatív maradó nyomószilárdság szempontjából.

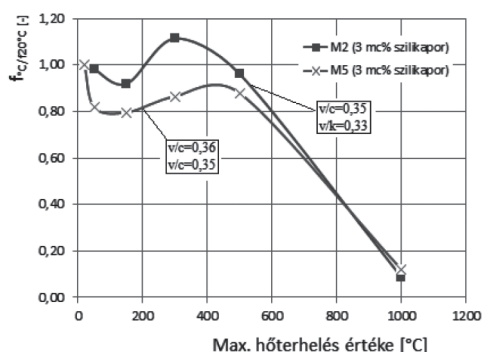
A vizsgálati eredmények tükrében elmondhatjuk, hogy 9 mc% szilikapor tartalom alkalmazása esetén az alacsonyabb víztartalom növeli a kezdeti nyomószilárdságot, viszont csökkenti a beton hőterhelés utáni relatív maradó nyomószilárdságát.



8. ábra Azonos kötőanyag tartalmú keverékek maradó relatív nyomószilárdság átlagértékei

Fig. 8. Relative residual compressive strength with constant binder content

Az M2-es és M5-ös keverékek szilikapor tartalma azonos (3 m_c%) volt, de a v/c és a v/k is változott. Megállapítottuk, hogy 3 m_c% szilikapor adagolás mellett kisebb v/c és v/k keverék bizonyult kedvezőnek a hőterhelés utáni maradó nyomószilárdság szempontjából (9. ábra).



9. ábra Azonos szilikapor tartalmú keverékek maradó relatív nyomószilárdság átlagértékei

Fig. 9. Relative residual compressive strength with constant silica fume content

5.2. Beton próbatetek maradó hajlító-húzó szilárdsága

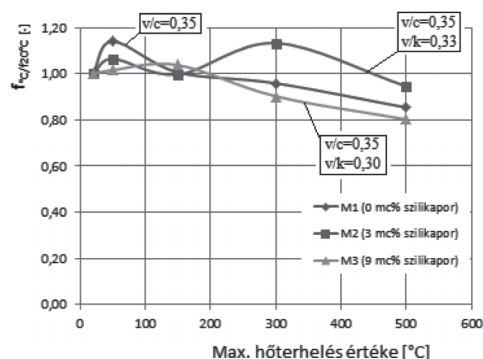
A maradó hajlító-húzó szilárdság megállapításához minden keverékből, minden maximális hőterhelési értéken 3–3 próbatestet vizsgáltunk és azok maradó hajlító-húzó szilárdság értékeit átlagoltuk (2. táblázat). Ezt követően grafikonon ábrázoltuk a relatív maradó hajlító-húzó szilárdság értékeiket.

A mért hajlító-húzószilárdságok átlagértéke (N/mm ²)						
T (°C)	M1 (0 m _c %)	M2 (3 m _c %)	M3 (9 m _c %)	M4 (0 m _c %)	M5 (3 m _c %)	M6 (9 m _c %)
20	9,24	9,20	10,03	9,74	8,28	8,98
50	10,54	9,80	10,19	9,14	9,05	8,79
150	9,30	9,17	10,41	7,68	9,90	9,10
300	8,86	10,42	9,05	7,68	8,56	8,26
500	7,89	8,70	8,05	7,19	6,71	6,65

2. táblázat Beton maradó hajlító-húzószilárdság átlagértéke
Table 2. The residual flexural strength of the concrete specimens

Azonos, 0,35-ös víz-cement tényezőjű (M1; M2 és M3) keverékek összehasonlítása során megállapíthatjuk, hogy (10. ábra) a 3 m_c% szilikaport tartalmazó (M2-es) keverék viselkedett 300°C feletti hőterhelés esetén a legkedvezőbben. 9 m_c% szilikapor adagolás esetén (M3-as keverék) már a relatív maradó hajlító- húzószilárdság kismértékű csökkenését figyel-

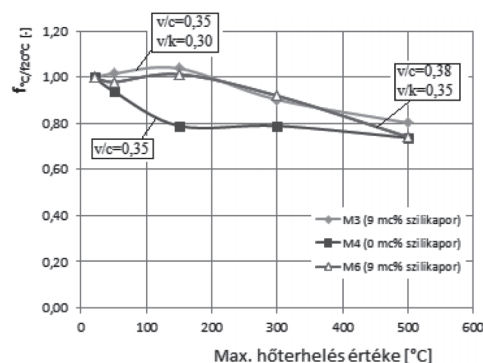
hettük meg – a szilikaport nem tartalmazó etalon (M1-es) keverék próbatesteinél mért értékekhez képest.



10. ábra Azonos v/c tényezőjű keverékek maradó relatív hajlító-húzószilárdság átlagértékei

Fig. 10. Relative residual flexural strength with constant w/c ratio

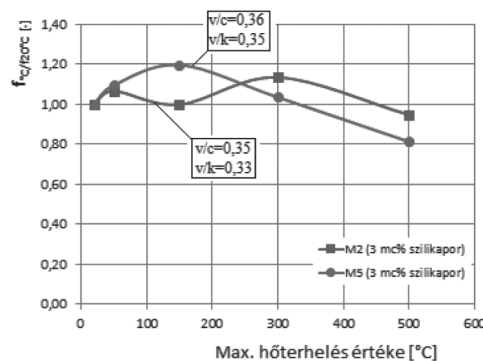
Azonos kötőanyag tartalmú (M3, M4, M6) keverékek összehasonlítása során megállapíthatjuk, hogy 9 m_c% szilikapor adagolás hatására a relatív maradó hajlító-húzószilárdság nőtt. Az azonos (9 m_c%) szilikapor tartalmú (M3-as és M6-os) keverékeknel számottevő eltérés nem volt megfigyelhető a hajlító-húzószilárdság tekintetében (11. ábra).



11. ábra Azonos kötőanyag tartalmú keverékek maradó relatív hajlító-húzószilárdság átlagértékei

Fig. 11. Relative residual flexural strength with constant binder content

Azonos szilikapor tartalmú (M2, M5) keverékek esetén a 300 °C, illetve az 500 °C hőterhelés utáni maradó hajlító-húzószilárdság szempontjából a kisebb v/c illetve v/k keverék (M2) bizonyult kedvezőbbnek (12. ábra).

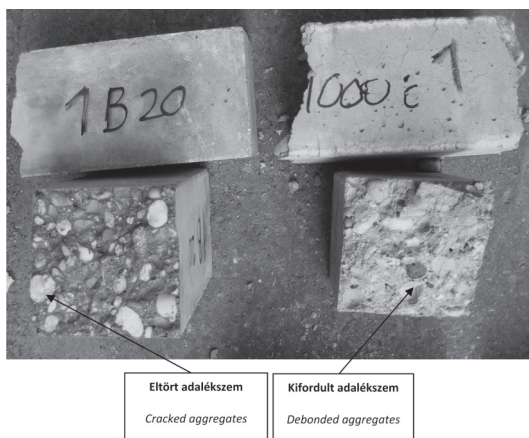


12. ábra Azonos szilikapor tartalmú keverékek maradó relatív hajlító-húzószilárdság átlagértékei

Fig. 12. Relative residual flexural strength with constant silica fume content

5.3. Szemrevételezés terhelés után

A törési felületeket vizsgálva látható, hogy 300 °C-os és annál kisebb hőterhelés esetén ridegtörés következik be. A nagyszilárdságú betonokra jellemzően az adalékszemek átrepedtek. 500 °C-os hőterhelésnél már vegyes törésképet kaptunk. Részben az adalékszemcsék törtek el, de többségében a kötőanyagból fordultak ki a szemcsék. 1000 °C-os hőterhelést követően már a cementpép szilárdsága nagymértékben lecsökkent. Így ekkor már a cementpépben következett be a tönkremenetel, és nem az adalékszemekben (13. ábra).



13. ábra Hőterhelés nélküli és 1000 °C-on hőterhelt próbatestek törési felülete a hajlító vizsgálat után

Fig. 13. Cracked surface of flexural strength specimens after failure without temperature loading and after temperature loading of 1000 °C

6. Megállapítások

Kísérleteink során a szilikaporról készített beton próbatestek tűzzel szembeni viselkedését vizsgáltuk.

A laboratóriumi vizsgálatok során a beton hőterhelés utáni maradó nyomószilárdsági, illetve maradó hajlító-húzószilárdsági értékeit határoztuk meg. Kísérleteink során a vizsgálati paraméterek a következők voltak: szilikapor tartalom (0 m_c%; 3 m_c%; 9 m_c%); cement tartalom (400 kg/m³; 436 kg/m³); víz-cement tényező (v/c = 0,35; 0,36; 0,38); víz-kötőanyag tényező (v/k = 0,35; 0,33; 0,30); hőterhelés maximális értéke (20 °C; 50 °C; 150 °C; 300 °C; 500 °C; 1000 °C).

A vizsgálataink alapján kijelenthetjük, hogy nem kedvező a relatív maradó nyomószilárdság szempontjából, ha a keverékhez – állandó cementtartalom mellett – a szilikapor tartalmat növeljük, miközben a v/c tényezőt változatlanul hagyjuk. A relatív maradó hajlító-húzószilárdság szempontjából alacsony (20–150 °C-os) maximális hőterhelési értéknél még kedvezőtlennek bizonyult – az állandó cementtartalom és v/c tényező mellett – a szilikapor tartalom növelése. 150 °C-t meghaladó maximális hőterhelési érték esetén kedvező volt a keverékhez való 3 m_c% szilikapor adagolása.

A relatív maradó nyomószilárdság az azonos kötőanyag tartalmú, de különböző szilikapor tartalmú (M6 és M4) keverékek esetén közelítőleg azonosak voltak, míg a relatív maradó hajlító-húzószilárdságot kedvezően befolyásolta, ha a cement egy részét szilikaporról helyettesítettük. A vizsgálati eredmények tükrében elmondhatjuk, hogy 9 m_c% szilikapor tartalom alkalmazása esetén az alacsonyabb víztartalom növeli a kezdeti nyomószilárdságot, viszont csökkenti a beton hőterhelés utáni relatív maradó nyomószilárdságát. A 9 m_c% szilikapor tartalom mellett a víztartalom nem befolyásolja a relatív maradó hajlító-húzószilárdságot.

A beton próbatesteken végzett vizsgálatok alapján kijelenthetjük, hogy tűzállóság szempontjából kedvezőnek bizonyult a szilikapor adagolása a keverékhez, mivel a szilikapor tartalom növelése csökkentette a betonfelület réteges leválásának veszélyét.

7. Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Új tehetség-gondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását a TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009 program támogatja.

Felhasznált irodalom

- [1] Kausay, T.: *Nagyszilárdságú beton*. Beton 2009/9 (2009), pp. 14-17
- [2] Held, M.: *Technologie und mechanische Eigenschaften des hochfesten Betons bis 125*. – Darmstädter Massivbau-Seminar. *Hochfester Beton*. Darmstadt, 1991
- [3] http://www.ask.com/wiki/WZMH_Architects (letöltve: 2011. 03. 05)
- [4] Structural design of composite super-columns for the Taipei 101 tower: www.ncree.org (letöltve: 2011. 03. 05.)
- [5] http://hu.wikipedia.org/wiki/Taipei_101 (letöltve: 2011. 03.05)
- [6] http://www.ita-hun.hu/palyazatok/pontokert/2.eloadas_20100603.pdf (letöltve: 2011. 03. 04.)
- [7] <http://silicafume.org/general-concrete.html> (letöltve 2011. 03.05.)
- [8] Kausay, T. - Balázs, L. Gy. - Csányi, E. - Kocsányiné Kopecskó, K. - Balázs, Gy. - Józsa, Zs. - Borosnyói, A. - Nehme, S. G.: *A betonkorrozó legújabb kutatási eredményei*. (30876-003-ÉA/2005) tanulmány, Budapest, (2005. november 30.)
- [9] MSZ 4798-1 Beton: *Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon*
- [10] <http://www.langlovagok.hu> (2010 aug.21-én letöltött statisztikát feldolgozva)
- [11] Majorosné Lublóy, É.: *Tűz hatása betonszerkezetek anyagaira* (PhD értekezés), Budapest, (2008)
- [12] <http://www.katasztrofak.abbcenter.com/?id=101876&cim=1> (letöltve: 2011. 08. 24.)
- [13] Scheider, U.: *Lebeda C. „Baulicher Brandschutz”*, Kohlhammer GmbH, Stuttgart, ISBN 3-17-015266-1 W. (2000)

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.4>

Czoboly Olivér – Harman Béla – Lublóy Éva – Balázs L. György – Nehme Salem Georges: *Szilikapor hatása A Beton tűzállóságára*. Épitőanyag, 64. évf. 1–2. szám (2012), 22–26. p.

INTERNATIONAL CONFERENCES

- **7th International Conference on “Microwave Materials and their Applications” – MMA 2012**
June 3–6, 2012, Taipei, Taiwan, Republic of China
<http://www2.phy.ntnu.edu.tw/MMA2012>

- **4th EuCheMS Chemistry Congress**
August 26–30, 2012, Prague, Czech Republic
<http://www.euchems-prague2012.cz>
- **23rd International Congress on Glass – ICG Prague 2013**
July 1–5, 2013, Prague, Czech Republic
<http://www.icg2013prague.cz>

Upgrading of TGA/DTA analyzer Derivatograph

RUDOLF PODOBA ▪ Department of Physics, Constantine the Philosopher University and Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology
▪ rudolf.podoba@ukf.sk ▪ rudolf.podoba@stuba.sk

ANTON TRNÍK ▪ Department of Physics, Constantine the Philosopher University and Department of Materials Engineering and Chemistry, Czech Technical University ▪ atrnik@ukf.sk

LUBOŠ PODOBNÍK ▪ Department of Physics, Constantine the Philosopher University
▪ lubos.podobnik@ukf.sk

Received: 23. 11. 2011. ▪ Érkezett: 2011. 11. 23. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.5>

An upgraded version of the TGA/DTA analyzer Derivatograph 1100° is described. A linear variable differential transformer (LVDT) is used as a sensor of the balance movement to register changes in the sample mass. The furnace temperature measured by a Pt-PtRh10 thermocouple located in its original position is controlled using the temperature programmer TLK 38. Thermocouples for DTA and their connections are left in the original state. Electrical signals from LVDT and thermocouples are sent to multimeter AGILENT 34972A which is connected to a PC. The program records the time of the measurement, furnace temperature, difference between the temperatures of the measured and the reference samples, and mass of the sample. The program's output is a graph with continuous TGA and DTA curves.

Keywords: differential thermal analysis (DTA), thermogravimetric analysis (TGA)

1. Introduction

The thermal analyses DTA and TGA are widely used in research of building materials, particularly in the development of building ceramics. Results are easier to interpret if both DTA and TGA are conducted during the same experiment using a combined analyzer. That is possible in the DTA/TGA analyzer Derivatograph 1100°, system F. Paulik, J. Paulik and L. Erdey [1]. Although the present-day DTA/TGA analyzers work well for small powder samples with mass less than 50 mg, in some cases it is preferable to measure compact samples of sizes and masses comparable to samples used in thermodilatometry or thermomechanical analyses. A derivatograph can measure compact samples up to 5 g and register a mass change up to ±1 g. This ability makes its modernization an important topic to study.

The original Derivatograph measured thermo-emf from thermocouples by mirror galvanometers which transform the electrical voltage into a motion of a light beam. The movement of laboratory balance was also monitored by a light beam. Four light beams (temperature, DTA, TGA and DTG) drew lines on a photographic paper. The temperature programmer was electromechanical.

The objective of this study is to describe an upgrade the original Derivatograph.

2. Short description of the modernized Derivatograph

A linear variable differential transformer (LVDT) was used as a sensor of balance movement to register change of the sample mass, see Fig. 1. The LVDT INPOS (ZPA Jinovice, Czech Republic), is very suitable for this purpose because its core can be easily detached from the body of the LVDT, and the core can be moved in the LVDT opening without a mechanical contact if the opening is in the vertical position. The LVDT was calibrated directly in the analyzer by known weights which were put on an empty crucible. The relationship between the

output voltage from the LVDT and the mass of the sample is linear; its sensitivity is reported in Table 1.

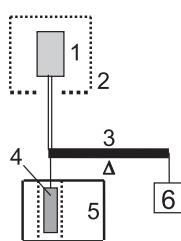


Fig. 1. Measurement of the mass change. 1 – sample, 2 – furnace, 3 – laboratory balance, 4 – ferromagnetic core, 5 – body of LVDT, 6 – counterweight
1. ábra A tömegváltozás mérése. 1 – minta, 2 – kemence, 3 – laboratóriumi mérleg, 4 – ferromágneses mag, 5 – LVDT test, 6 – ellensúly

sensitivity of balance	20 mg	50 mg	100 mg	200 mg	500 mg	1000 mg
sensitivity of LVDT	15.825	8.486	4.692	2.443	1.059	0.534

Table 1. Sensitivity of LVDT [mV/mg] for different sensitivities of balance
1. táblázat Az LVDT érzékenysége [mV/mg] a mérleg különböző érzékenységei mellett

The furnace temperature measured by a Pt-PtRh10 thermocouple located in its original position is controlled using a temperature programmer TLK 38 connected to the power block. We used a solid state relay in the power block instead of the original electromechanical relay. The rest of the power block is left without changes.

The thermocouples for DTA and their connections are left in their original positions.

The derivative thermogravimetry (DTG) can be also performed by the Derivatograph 1100°. The induced electrical voltage which comes from a very slow movement of the coil in a gap of the permanent magnet is very low and, in our conditions, it contains a significant amount of noise. The noise is probably caused by the vibrations of the laboratory balance. The noise is also recorded by the LVDT, so the TGA line is not ideally smooth. The numerical derivative of the data gives the DTG line with a big noise. Those are the reasons why we did not use the DTG.

Mgr. Rudolf PODOBA

(1984) Education: Constantine the Philosopher University in Nitra, physics of materials (degree - Mgr., 2009). Constantine the Philosopher University in Nitra, physics of materials (PhD. Student, 2009). Field of research: thermal analyses of the green clay ceramic materials.

RNDr. Mgr. Anton TRNÍK, PhD

(1978) Education: Constantine the Philosopher University in Nitra, Physics and Computer science (degree Mgr. 2003); PhD study of Physics of materials at Constantine the Philosopher University in Nitra (degree PhD. 2006). Field of research: mechanical properties and thermophysical properties of building ceramics, measurement science.

Mgr. Luboš PODOBNÍK

(1986) Education: Constantine the Philosopher University in Nitra, mathematics and physics (degree - Bc., 2008). Charles University in Prague, mathematics and physics (degree - Mgr., 2011). Constantine the Philosopher University in Nitra, physics of materials (PhD. Student, 2011). Field of research: the phase changes in silicate ceramics.

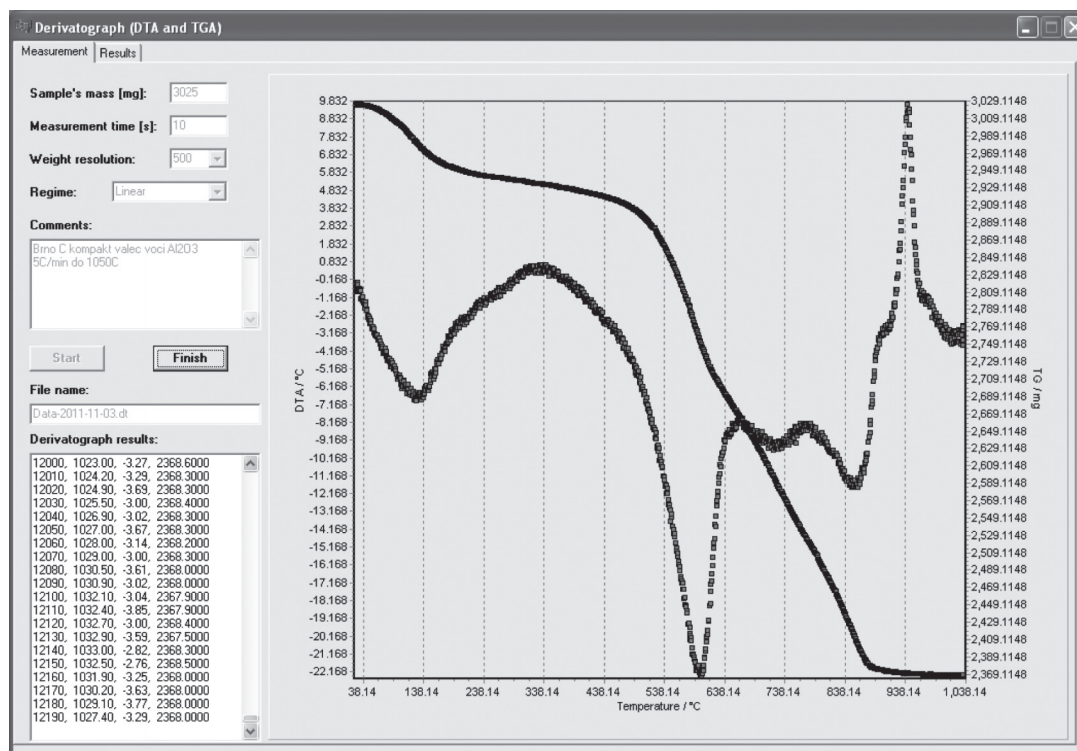


Fig. 2. Results of DTA (dotted line) and TGA (black line)
2. ábra DTA (szaggatott vonal) és TGA (folytonos vonal) eredmények

Electrical signals from the LVDT and thermocouples are lead by shielded cables to the inputs of the digital multimeter AGILENT 34972A which is connected to a PC. The program transforms the input thermoelectrical voltage U_{ic} into the temperature T with the help of the formula for conversion $U_{ic} [\mu V] \rightarrow T [^{\circ}C]$ given in [2]. The furnace temperature and the temperature difference for the DTA are obtained this way. The output voltage from the LVDT is converted into the change of the sample mass using a formula derived from the results of the LVDT calibration. The program records four types of data: the time of the measurement t , the furnace temperature T , the difference between the temperatures of the measured and the reference samples ΔT , and the mass of the sample m (see window "Derivatograph results" in Fig. 2.) which can be used for processing in a different format, e.g., in Excel (Microsoft). The TGA and DTA curves which are visible on a screen are drawn continuously.

The initial input data are the sample mass, repeating frequency of the measurement (one measurement in 10 s in Fig. 2.), sensitivity of the balance, and the type of the temperature regime (linear or isothermal heating).

To illustrate this, we show a screen capture (Fig. 2.) with TGA and DTA curves for the compact sample (60 wt.% kaolinitic clay, 20 wt.% filler and 20 wt.% $CaCO_3$). Both the measured and the reference samples are approximately of the same size and mass. They have a cylindrical shape with an opening of $\varnothing 3 \times 8$ mm in the axis of rotation used to insert them on thermocouples. The reference sample is made from pressed Al_2O_3 powder.

Some examples of the use of the modernized Derivatograph are in our previous works [3, 4, 5].

Acknowledgement

This work was supported by the grant VEGA 1/0646/12, financed by the Ministry of Education of Slovakia. Author A.T.

gratefully acknowledges a financial support from the Czech Science Foundation, Project No. P105/12/G059.

References

- [1] Derivatograf system F. Paulik, J. Paulik a L. Erdey, manual, MOM Budapest
- [2] ITS-90 Thermocouple Direct & Inverse Polynomials. <http://www.omega.com/pdf/temperature/Z/pdf/z198-201.pdf>, online, 7.11.2011
- [3] Trník, A. – Štubňa, I. – Varga, G. – Podoba, R. – Bačík, P.: *Young's modulus of heatproof tile ceramics Letovice during firing*. Journal of the Ceramic Society of Japan, **119**, 2011, 645-649
- [4] Štubňa, I. – Trník, A. – Vozár, L.: *Thermomechanical and thermodilatometric analysis of green alumina porcelain*. Ceramics International, **35**, 2009, 1181-1185
- [5] Štubňa, I. – Trník, A. – Vozár, L.: *Determination of Young's Modulus of Ceramics from Flexural Vibration at Elevated Temperatures*. Acta Acustica united with Acustica, **97**, 2011, 1-7

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.5>

Rudolf Podoba – Luboš Podobník: *Upgrading of TGA/DTA analyzer derivatograph*. Építőanyag, 64. évf. 1-2. szám (2012), 28-29. p.

Egy derivatográf (TGA/DTA elemzőberendezés) korszerűsítése

A közleményben egy Derivatograph 1100° típusú TGA/DTA elemzőberendezés korszerűsítéséről számolunk be. A minta tömeg változását a mérleg elmozdulását követő változtatható differenciális átalakítóval (LVDT) követjük. A kemence hőmérsékletét az eredeti helyzetben rögzített Pt-PtRh10 hőelemmel mérjük és az TLK 38 hőmérsékletprogramozóval szabályozzuk. A DTA hőelemeket és csatlakozóikat az eredeti helyükön rögzítettük. Az LVDT-ből és a hőelemekből érkező elektromos jeleket egy számítógéphez csatlakozó AGILENT 3497A típusú multiméterhez továbbítjuk. A program a következő jellemzőket rögzíti: mérés időpontját, a kemence hőmérsékletét, és mért és a referenciáink közötti hőmérsékletkülönbséget és a minta tömegét. A program grafikusán szolgáltatja a TGA és DTA görbéket.

Kulcsszavak: differenciális termikus elemzés (DTA), termogravimetriás elemzés (TGA)

Neurális hálók aszfalttechnológiai alkalmazása

KONCSOS TAMÁS ▪ BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék ▪ bonsalty@gmail.com

TÓTH CSABA ▪ BME Út és Vasútépítési Tanszék ▪ toth@uvt.bme.hu

Érkezett: 2012.03.25. ▪ Received: 25.03.2012. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.6>

Asphalt technological application of the neural network

The article depicts a possible asphalt technological application of the neural network using the data of the numerous stiffness tests of three domestic asphalt mixtures. The results reinforce the preliminary expectations by which the MLP (Mutilayer Perceptron) network built upon the tests results specified by indirect tensional tests is capable of prognosticating the stiffness very precisely in the trained range. Although the possible drawback of the method may be observed in its inexact extrapolating ability, it can be improved by the continuous development of the database furthermore managed having produced a combined map using the Kohonen map just as in this present work. The article verifies that the estimation of the stiffness of the mixtures made with the help of the neural network is a lot better than those applied at the traditional models, furthermore draws the attention to the fact that the superbness of the neural network lies exactly with their universality and the optional feature of the mixtures can be tested and prognosticated in the future with their help.

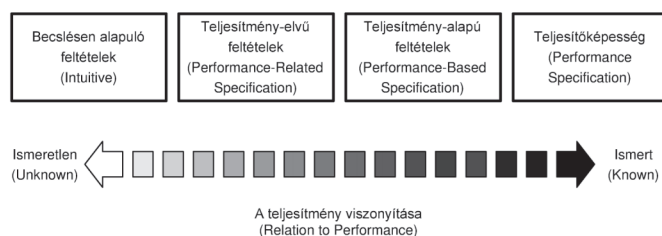
1. Az aszfaltkeverékek merevségének jelentősége

Sajnos ma sem állíthatjuk, hogy a hazai aszfaltreológiai kutatások a világ élvonalba tartoznának, azonban ennek fényében különösen örvendetes, hogy egy korábbi szakmai döntés nyomán az aszfaltkeverékek tervezési követelményeinek meghatározása vonatkozásában az empirikus előírásokkal szemben a fundamentális előírások kerültek rögzítésre. Ezen döntésnek köszönhetően azonban a teljesítményalapú követelmények és az ezekhez rendelt, elsősorban a keverékek fáradásával, illetve merevségével kapcsolatos vizsgálatok jelentősége is megnőtt.

Az EN 13108-20:2006 európai szabvány – ez elv szerint – az aszfaltkeverékek tulajdonságainak esetében megkülönbözteti vizsgálati módszereit, például:

- performance-related (leistungsbezogen): vízerzékenység, üzemanyag-állóság, maradó alakváltozással szembeni ellenállás kis, illetve nagy kerek nyomvályúvizsgáló vizsgálórendszer esetén,
- performance-based (leistungsbasierend): merevség, fáradás, maradó alakváltozással szembeni ellenállás triaxiális vizsgálat esetén.

Az 1. ábra a teljesítményelvű és teljesítményalapú vizsgálatok közötti finom különbség demonstrálására tesz kísérletet.



1. ábra A teljesítmény szintek illusztrációja (Tóth, 2006)

Fig. 1. Illustration of various levels of performance specifications (Tóth, 2006)

A teljesítményalapú aszfaltvizsgálatok kiemelt jelentőségével egyetértve a BME Út és Vasútépítési tanszékén – a rendelkezésre álló forrásokhoz mérten – jelentős kutatások folynak

Dr. TÓTH Csaba

Okl. építőmérnök, MBA, PhD. A Magyar Mérnöki Kamara és a Magyar Útgyi Társaság Út pályaszervezetek Szakbizottság tagja, jelenleg az BME Út és Vasútépítési Tanszék adjunktusa. Korábban a Csongrád Megyei Állami Közútkezelő Kht., illetve az Állami Közúti Műszaki és Információs Kht. osztályvezetőjeként a magyar útgyi adminisztrációban dolgozott. Később a Strabag Konzern mérnökeként részt vett az épülő hazai országos közúthálózat minőségellenőrzésében, valamint a Konzern nemzetközi és hazai kutatásaiban. Közlekedési építőmérnöki szakértőként, tervezőként, illetve műszaki ellenőrként közreműködött számos burkolat-megerősítési projektben. Kutatási területe: hajlékony útpályaszervezetek igénybevétele, méretezése, teherbíró-képessége, megerősítése. Publikációinak száma: több mint 30.

KONCSOS Tamás

Okl. építőmérnök, jelenleg a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék PhD hallgatója.

Korábban a GeneralCom-nál dolgozott programozói munkakörben, illetve a BME VKKT-val közösen folytatott WateRisk vízgazdálkodási döntéstámogató rendszer kiépítésében

tevékenykedett. Az FVM megbízásában a LeoEpa hálózat szimulációs program tervezője, jelenleg számos hazai kutatási tevékenységben vesz részt. Kutatási tevékenységek: mesterséges intelligencia, lágy számítási módszerek alkalmazása a környezetmérnöki gyakorlatban, neurális hálózatok applikációja optimalizációs feladatok megoldására, szakértői rendszerek fejlesztése. Publikációinak száma: 6.

e területen, amelyek nyomán az elmúlt időszakban született értekezések már elsősorban az aszfaltkeverékek merevségével, illetve fáradási tulajdonságaival kapcsolatos kérdésekre is fókuszáltak. A téma aktualitását mutatja továbbá, hogy az aszfaltkeverékek merevsége kapcsán az elmúlt időszakban számos cikk is született. Többek között egy, az aszfaltkeverékek merevségének prognosztizálási lehetőségével kapcsolatos cikkben (Fi-Tóth, 2010) említésre került már a mesterséges neuron-hálózatok (ANN, artificial neural network) alkalmazhatósága az aszfaltkeverékek merevségét becsülő modellek megalkotása sorában.

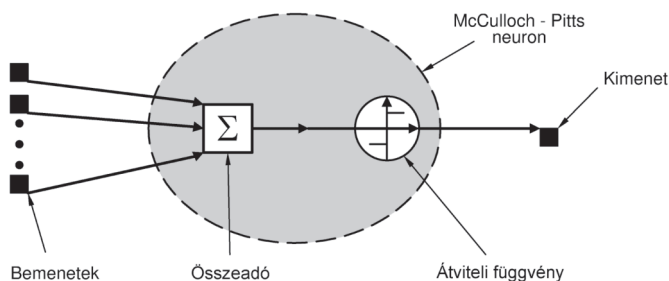
Az ANN elvét az emberi idegrendszer, az agy idegsejtjeinek működése ihlette, és noha az 1940-es évek végén kezdődő kutatások eredeti célja az emberi agyfunkciók szimulálására irányult, az ANN modelleket ma már például a statisztikai elemzések vagy az adatfeldolgozás területén is alkalmazzák, többnyire nem-lineáris folyamatok elemzésére. Ezek a modellek azonban elsősorban a mérési eredmények technikai feldolgozása során jelentenek segítséget, erre alapozva azonban különböző becslések kidolgozására is képesek.

Jelen cikkben korábbi kutatások (Fi et al, 2009) nyomán született adatbázis segítségével az ANN technika aszfalttechnológiai alkalmazhatóságát demonstráljuk. Felhívjuk azonban a figyelmet arra, hogy ezen elv alkalmazhatósága lényegesen sokoldalúbb, elég, ha csak azon modelleket említjük, amelyek az útpályaszervezetek Falling Weight Deflectometerrel (FWD) mért behajlási teknőinek kiértékelésére készültek (Saltan et al, 2011), de akár egyszerű laboratóriumi vizsgálatok elemzésére, például Marshall stabilitás előrejelzésére alkalmas modellek is készíthetők (Ozgan, 2011).

2. Neurális hálók

A mesterséges neurális hálózatok alapjait Cajal teremtette meg 1909-ben, amikor a gerincesek tanulmányozása során észrevette, hogy az állatok agya nagyszámú összekötött sejtből áll, amiket neuronoknak nevezett. Azóta igazolódott, hogy ezek képezik az információfeldolgozás alapvető részegységeit. Felfedezték, hogy egy neuronnak vannak olyan ágai, amelyek begyűjtik az érkező ingereket, majd egy másik ágon, továbbítják az erre adott választ.

A neuronok egyszerűsített matematikai modelljét W. S. McCulloch és W. Pitts készítette el 1943-ban. A modellben minden egyes bemenethez rendelhető egy súly, majd a súlyozott bemenetek összege a neuron átviteli függvényén keresztül adja a kimenetet (2. ábra).



2. ábra A McCulloch-Pitts neuron (Abonyi, 2006)
Fig. 2. The McCulloch-Pitts neuron (Abonyi, 2006)

Ez az összefüggés könnyen algoritmizálható, a kapcsolat az (1) egyenlettel írható le.

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i\right) \quad (1)$$

ahol:

y: a neuron kimenete

f(): átviteli függvény

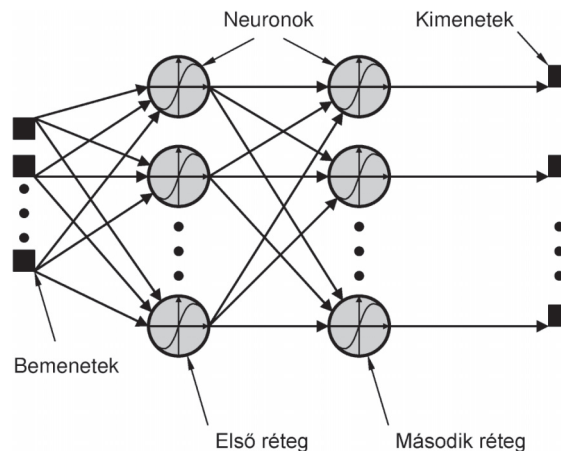
w_i: súlytényező

x_i: a neuron bemenetei (független változók)

A neuron jel-transzformációs képessége speciális, többértékű logikai kapuként is értelmezhető. A súlytényezők megválasztásával a rendszer szűk korlátok között taníthatóvá válik, azaz adott kimeneti jelek állíthatók elő a bemeneti minták alapján. A neuronok összekapcsolásával olyan hálózatokhoz jutunk, melyek már összetett matematikai feladatok megoldására is alkalmasak (adattömörítés, asszociatív memória, rendezés, univerzális függvényközelítés).

Függvényapproximációs célokra a nem rekurrens mesterséges neuron hálózatok leggyakrabban alkalmazott változata az előrecsatolt, többrétegű háló: MLP (Multilayer Perceptron). Az MLP rétegelt, a réteg fogalma alatt esetünkben egy neuron halmazt értünk, melyekre érvényesek az alábbi megkötések: az összes réteg valamennyi neuronja az előtte és utána álló réteg minden neuronjával kapcsolatban áll, azonban a sejtek nem kapcsolódnak egymáshoz a saját rétegen belül. A bemeneti réteg annyi neuronból áll, ahány bemenő változónk van. Ezek tulajdonképpen jeltovábbítást végeznek a többi csomópont felé. A első rétegben található a rejtett neuronok, amelyek száma tetszőleges lehet. Ezeknek mind a bemenete, mind a kimenete másik csomóponthoz kapcsolódik. Itt folyik a tulajdonképpeni

adatfeldolgozás. Matematikailag bizonyított, hogy a kétrétegű MLP elvben bármely folytonos függvény közelítésére alkalmas. Azonban figyelembe véve azt a tényt, hogy a rendelkezésre álló információ mennyisége korlátos és a megoldandó feladat a komplexitás függvényében akár egyszerűbb, de összetett módszerekkel is megoldható, a kétrétegű háló, illetve az MLP topológia sok esetben helyettesítendő. A kimeneti rétegben annyi neuron van, ahány kimeneti változónk van. Ezek továbbítják az információt a külvilág felé. A 3. ábra egy többrétegű háló kialakítást szemléltet.



3. ábra A többrétegű neurális háló szerkezete (Abonyi, 2006)
Fig. 3. The structure of the multilayered neural network (Abonyi, 2006)

A teljes MLP hálózat a (2) egyenlettel írható le:

$$\hat{y} = w_0 + \sum_{i=1}^m w_i \left(w_{i0} + f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot x_j\right) \right) \quad (2)$$

ahol

y: a hálózat kimenete (becsült függő változó)

f(): átviteli függvény

w_i: súlytényező

x_j: a hálózat bemenetei (független változók)

n: független változók száma

m: neuronok száma a rejtett rétegben

A neurális hálózatot meg kell tanítani a probléma megoldására. Ez jellemzően azt jelenti, hogy valamilyen nemlineáris optimalizációs eljárással keressük azokat a súlytényezőket, amelyeknél a hálózat az adott regressziós feladatot jól megoldja.

Az MLP hálózatok legfontosabb tulajdonságai (Abonyi, 2006):

- univerzálisak, a legtöbb regressziós probléma esetén használhatók,
- az extrapolációs tulajdonsága megjósolhatatlan, ezért nagyon fontos hogy a tanítási minta lefedje mind a függő, mind a független változók teljes tartományát,
- megfelelő számú neuron esetén a regressziós modell pontossága jó,
- a neurális háló tanítása lassú, nagy körülmények között igyekezzünk gyorsítani, de a modell kiértékelése gyors,
- a kész hálózat nem interpretálható.

2. Az adatbázis

Egy korábbi kutatás keretében (Fi et al, 2009) a kőváz összetételének merevségre gyakorolt hatását vizsgáltuk három keverék esetén. A vizsgált keverékek típusa SMA 11 (F), AC 22 (F) és AC 22 (mF) volt, három-három különböző kővázalattal tervezve. A tervezett szemeloszlások úgy lettek meghatározva, hogy egy-egy, a korábbi hazai szabályozás szerinti alsó, illetve felső határgörbe szemeloszlásának, további egy pedig ezen két szemeloszlás átlagának feleljen meg. Emellett a különböző kővázalattal keverékek 3-3-féle kötőanyag-tartalommal lettek előállítva.

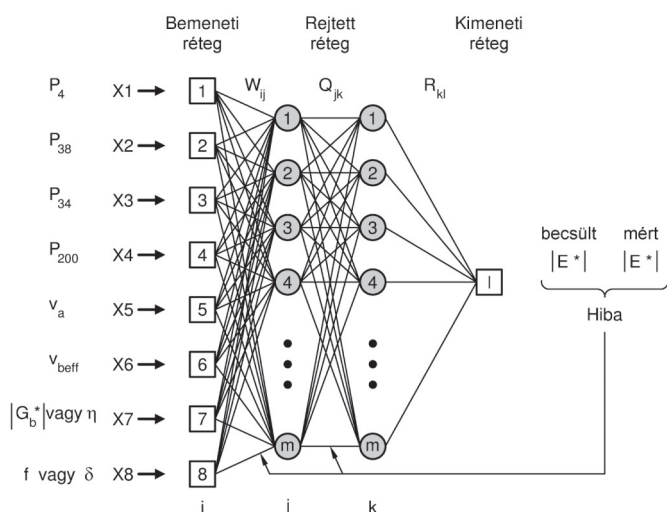
A merevségvizsgálatokat – négy különböző hőmérsékleten – indirekt húzóvizsgálattal (IT-CY) végeztük. Ez a vizsgálat ugyan alapvetően nem képes különböző terhelési szintek megvalósítására, korábbi kutatásaink alapján azonban azt tételeztük fel, hogy a felfutási idő változtatásával a frekvenciatelhelés jól szimulálható. Ennek érdekében a vizsgálatokat – a szabvány által előírt 124 msec felfutási idő helyett – négy terhelési szinten: 60, 90, 120, 150 msec felfutási idővel végeztük.

Figyelembe véve az eltérő szemeloszlás, a különböző kötőanyag-tartalom, illetve terhelési idő és vizsgálati hőmérséklet miatt létrejött változatokat, a merevségvizsgálatok száma keverékenként 144 darab volt, azaz mindösszesen 432 darab merevségvizsgálati eredmény állt rendelkezésre. Az így előállított adatbázis megteremtette annak lehetőségét, hogy a neurális háló segítségével építsük egy merevség előrejelző modellt és vizsgáljuk annak pontosságát.

3. Aszfaltkeverék merevség becslő modell MLP hálóval

Az aszfaltkeverék-merevség előrejelző modell kiépítéséhez először be kell táplálni az input adatokat és az észlelt eredményeket. Minél több keverék-összetételt és a hozzátartozó mért merevségi adatokat táplálunk be egy ilyen rendszerbe, annál pontosabban súlyozódnak az egyes lehetséges összefüggések és annál pontosabb lesz a prognózis.

Az input adatok lehatárolásánál – hasonlóan a nemzetközi gyakorlathoz – a Witczak-féle modell struktúráját (NCHRP, 2004) használtuk a 4. ábrán láthatóak szerint.

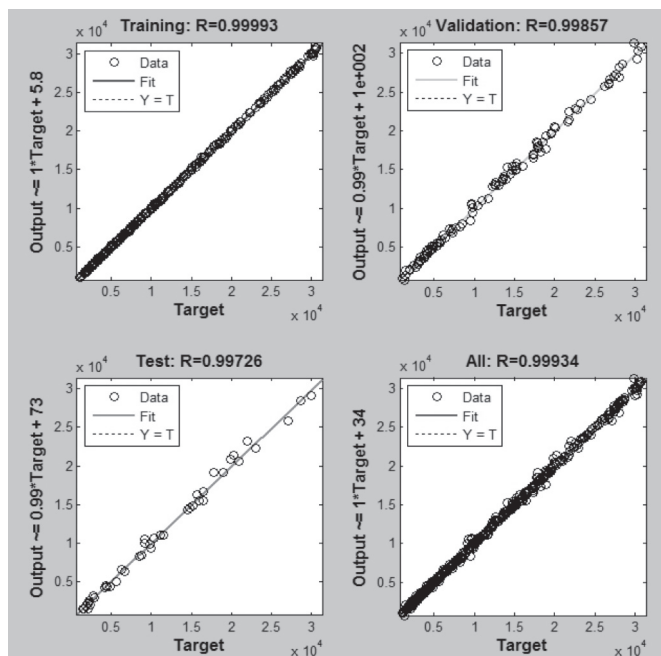


4. ábra Az alkalmazott MLP háló szerkezete
Fig. 4. The structure of the MLP network applied

A nemzetközi gyakorlathoz hasonlóan mi is azt tételeztük fel, hogy a vizsgálati eredményeket 8 paraméter elegendően pontosan határozza meg. A háló készítés során azonban az angolszász szitaméretet a hazai gyakorlatnak megfelelően aktualizáltuk, illetve a terhelési időt nem frekvenciában, hanem az IT-CY vizsgálat felfutási idejében adtuk meg. Továbbá a 20 °C-on nehézkesen meghatározható bitumen viszkozitás értékeket nem mértük, hanem penetráció mérés alapján becsültük. Mint az a 4. ábrán látható, a háló input adatai az alábbiak voltak:

- szemeloszlási görbe négy paramétere (p_i),
- V_a : szabadhézag-tartalom,
- V_{beff} : kötőanyag-tartalom,
- t : terhelési idő,
- η : kötőanyag viszkozitás (penetrációs érték alapján becsült).

Az így felépített MLP hálót a rendelkezésre álló mérési adatbázist kettéosztva, annak 300 mérési eredményének segítségével „tanítottuk be”. Az adatbázisunk második részével, azaz 132 darab mérési eredményével a háló pontosságát vizsgáltuk, validáltuk. A betanító és a validáló futtatások eredményeit összevetve a mérési adatokkal az 5. ábrán látható eredményeket kaptunk.



5. ábra Az előzetesen kapott eredmények statisztikai mutatói
Fig. 5. The statistical indexes of the preliminary results

A validált adatok alapján a korrelációs együttható magas értéke – megegyezően a nemzetközi eredményekkel – egyhez közelít, ami korábbi, hagyományos merevség-előrejelző modellekhez képest lényegesen pontosabb.

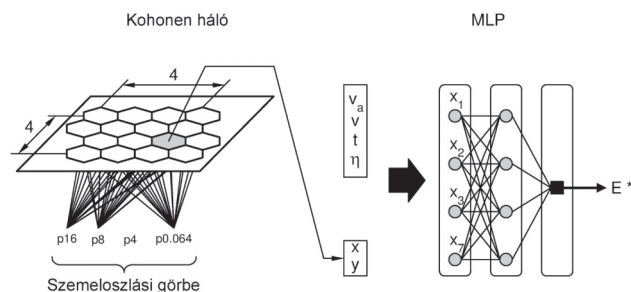
4. Az eredmények finomítása: a Kohonen háló

A háló tesztelése és az eredmények részletesebb tanulmányozása során azonban azt a következményt tapasztaltuk, hogy a háló merevség-előrejelző pontossága, ha eltérünk a tanításkor használt összetételi paraméterektől, romlik. A validációra kapott jó eredmény azzal magyarázható, hogy az ellenőrzés nem terjedt ki a szemeloszlási görbék kapcsolatának feltárására, a validált

minták ugyanis ugyanarra a 6 szemeloszlási görbére estek, mint a tanítási minták, azaz a neurális háló csak interpolációs feladatot oldott meg. Ez egy várt következmény, lévén a fentiekben a hálók legfontosabb tulajdonságai között megemlítettük az extrapolációs hibát. Ez a hiba természetesen a jövőben az adatbázis fejlesztésével folyamatosan javítható, arra kell törekednünk, hogy a tanítási minta minél teljesebb körben lefedje mind a függő, mind a független változók teljes tartományát.

Jelen esetben azonban szemeloszlási görbe kisebb változtatása is a neurális háló pontatlan előrejelzéséhez vezethet. Az extrapolációs hibák kiküszöbölése osztályozási módszerrel valószínűsíthető meg. Az alapötletünk, hogy a különböző adalékok a szemeloszlási görbéjük karakterisztikáját tekintve besorolhatók az általunk definiált szemeloszlási görbék egyikéhez. A feladat vektor-klaszterezéssel végezhető el, mely egy speciális, második neurális hálózat alkalmazásának szükségességét veti fel. A célunk tehát az n -dimenziós ($n > 2$) input minták egy kisebb dimenziós kimeneti réteg egy-egy elemére leképezni úgy, hogy a kívánt leképezés a bemeneti tér topológiai tulajdonságát megőrizze. Ugyanezt a logikai elvet követi az agy, „térbeli fogalmak” pl. hang, szag, vizuális és egyéb információk jelentéstartalmi szétválasztásánál, asszociációjánál.

A klaszterezést a Kohonen háló alkalmazásával értük el. Az önszervező térkép méretét 4×4 -esnek definiáltuk, mozgásteret engedve korlátozott extrapolációra (6. ábra).



6. ábra A kombinált neuronhálózat vázlatos rajza
Fig. 6. The rough sketch of the combined neuron network

A betanított Kohonen háló bármely szemeloszlási görbét egy-egy koordinátával párosított, így a bemenetek száma 2-vel csökkent. A görbék alapján az előállított koordinátákat felhasználva és a másik négy paraméterrel kombinálva az MLP korábbi extrapolációs hibája drasztikusan lecsökkent.

5. Összefoglalás

A neurális hálók aszfalttechnológiai alkalmazásának egyik lehetőségét három hazai aszfaltkeverék nagyszámú merevség vizsgálati adatsorát felhasználva mutattuk be. Igazoltuk, hogy az IT-CY

vizsgálati eredményekre épített MLP háló a betanított tartományban nagy pontosságú merevség előrejelzésre képes, és hátránya ugyan a pontatlan extrapolációs képességében tetten érhető, ez az adatbázis folyamatos fejlesztésével folyamatosan javítható.

Átmeneti megoldásként a Kohonen-háló felhasználásával létrehoztunk egy olyan kombinált hálót, amely ezen extrapolációs hibákat jelentős mértékben képes csökkenteni, így a modell a járatos hazai keverékek esetén képes – a technológiaiailag elképzelhető – összes összetétel esetén merevség-előrejelzésre.

Jelen cikkben ugyan a keverékek merevségének az összetétel alapján történő prognosztizálhatóságára helyeztük a hangsúlyt, de természetesen a neurális hálók nagyszerűsége éppen univerzalitásukban rejlik, segítségükkel a keverékek tetszőleges jellemzője vizsgálható, előre jelezhető. Ennek fényében az aszfaltgyártás során az eddig nem vizsgált input-output adatok közötti kapcsolatok vizsgálatában minden érdeklődő számára nagy segítséget jelenthet.

Kutatásunk további célja lehet a genetikus programozás adta lehetőségek felhasználása aszfalt keverékek jellemzőinek vizsgálatánál. A genetikus programozás az evolúció biológiában ismert szelekciós elvet alkalmazza az emberi beavatkozás nélküli tervezéshez. Használatuk előnye abban mutatkozik, hogy a neurális háló fekete doboz jellegű megoldásaival ellentétben könnyen interpretálható modellek jönnek létre, így a kapott válasz egyenletek formájában is megadhatók.

Felhasznált irodalom

- [1] Tóth Csaba: *A teljesítményi szabályozás nyújtotta többlet lehetőségek az útépitésben*, X. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, 2006. június. Kiadó: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság. Szerkesztő: Köllő Gábor. ISBN (10) 973-7840-13-5, pp 331–336.
- [2] Dr. habil Fi I. – Tóth Cs.: *A szemeloszlás-változás aszfaltkeverék merevségre gyakorolt hatásának prognosztizálhatósága*. Közlekedésépítési Szemle, 60. évf. 2010/12. pp 24 – 31.
- [3] M. Saltan et al: *Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining*. Expert Systems with Applications, Volume 38, Issue 3, March 2011, Pages 2600-2608
- [4] E. Ozgan: *Artificial neural network based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete*. Expert Systems with Applications Volume 38, Issue 5, May 2011, Pages 6025-6030
- [5] Dr. habil Fi, I. – Pethő, L. – Bocz, P. – Tóth, Cs.: *Aszfaltkeverékek teljesítményének vizsgálata*. KKK kutatási program, megrendelő: Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ. (2009)
- [6] National Cooperative Highway Research Program: *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. NCHRP 1-37-A: 2004
- [7] Dr. Abonyi J. (szerk): *Adatbányászat a hatékonyság eszköze*. 2006

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2012.6>

Koncos Tamás – Tóth Csaba: *Neurális hálók aszfalttechnológiai alkalmazása*. Építőanyag, 64. évf. 1–2. szám (2012), 30–33. p.

IPARI GÁZOK KATALÓGUSA – AZ ONLINE TUDÁSTÁR

A gázok előállításával, szállításával, tárolásával és felhasználásával kapcsolatos legfontosabb információkat 216 oldalban összefoglaló Ipari Gázok Katalógusa már a www.messer.hu oldalon, elektronikus formában is elérhető. A gázok részletes adatain és az azokkal kapcsolatos általános tudnivalókon kívül a katalógus beszámol a

főbb előállítási módszerek alapjairól, a szállítási–tárolási–ellátási formák és eszközök részleteitől, a gázellátó és alkalmazástechnikai rendszerek adatairól, valamint a gázok helyes kezeléséhez szükséges biztonságtechnikai ismeretekről. Az e-katalógus elsődleges célja, hogy segítséget nyújtson vevőinknek az ipari gázok célszerű és gazdaságos kiválasztásához, vásárlásához, kezeléséhez és felhasználásához.

http://messer.hu/Infotar/Ipari_Gazok_Katalogusa