

A STROUHAL-SZÁM: EGY ÉRDEKES ADAT A MADARAK ÉS ROVAROK REPÜLÉSÉNEK VIZSGÁLATÁHOZ

Hágen András
Újvárosi Általános Iskola, Baja

A biomechanikában is fontos szerepet játszanak bizonyos dimenzió nélküli mennyiségek, amelyek lehetőséget adnak a különféle állatfajok mozgásának összehasonlítására, a különbségek és hasonlóságok számszerűsítésére. Egyik ilyen mennyiség a Strouhal-szám, amit *Vincenc Strouhal* (1850–1922) cseh fizikus vezetett be 1878-ban. Ő eredetileg a távíróhuzalok keltette zaj frekvenciájának tanulmányozására használta ezt a mennyiséget, de később a Kármán-féle aerodinamikában is szerepet kapott.

Áramló sűrűlő folyadékokba vagy gázokba helyezett, nem kifejezetten áramvonalas test mögött örvénytér keletkezik, amennyiben az áramlás sebessége eléri egy adott értéket. Egymással ellentétes irányba forgó örvények jönnek létre, amelyeket elég nagy forgási sebesség elérése esetén – tehetetlenségükből adódóan – magával ragad a sűrűlő közeg. A leszakadó örvények egyenként követik egymást és ellenkező forgásirányúak, ezt nevezzük a Kármán-féle örvénysornak.

A Kármán-féle örvénysor a Reynolds-számmal van szoros kapcsolatban: $Re = vd/\mu$, ahol v a μ kinematikai viszkozitású folyadék sebessége a d átmérőjű hosszú henger előtt. A Kármán-féle örvénysor 90 körüli Reynolds-szám felett jelenik meg.

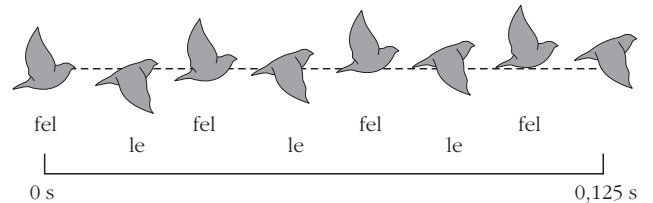
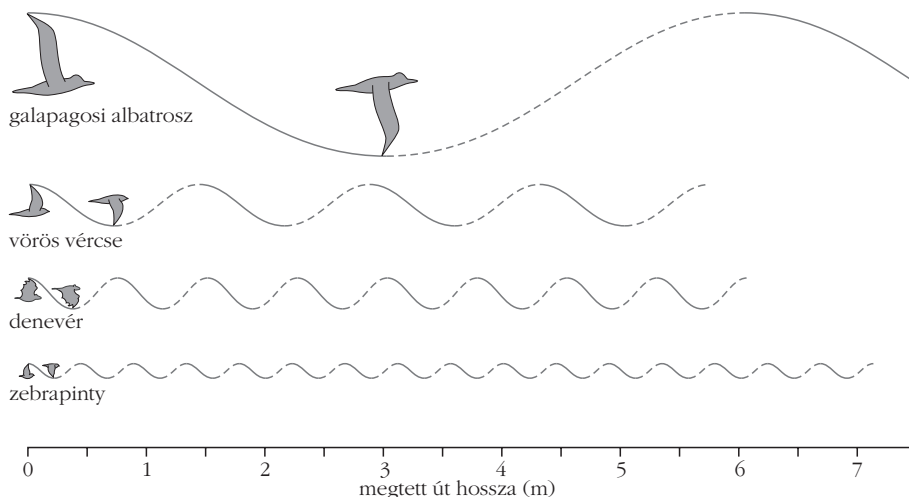
Az örvényleválás f frekvenciájával meghatározott

$$S = \frac{fd}{v}$$

Strouhal-szám érthetően kapott szerepet az örvényes áramlás sebességformuláiban.

A periodikus gerjesztés igencsak káros lehet, figyelemmel kell lenni az esetenként kialakuló és leváló örvénysorokra. Veszélyes helyzet alakulhat ki, ha

2. ábra. A galapagoszi albatrosz (*Phoebastria irrorata*), a vörös vércse (*Falco tinnunculus*), a jamaicai gyümölcsdenevér (*Artibeus jamaicensis*) és a zebra-pinty (*Taeniopygia guttata*) szárnycsapkodási amplitúdóinak szemléltetése [3].



1. ábra. A zebra-pinty (*Taeniopygia guttata*) szárnycsapkodása [3].

egy más mögött sorban több magas ipari hűtőtorony épült fel. A kör keresztmetszetű hosszú testeknél az örvényleválás f frekvenciája a Reynolds-szám és a Strouhal-szám közötti összefüggésből számítható.

A Strouhal-szám biomechanikai alkalmazása

A repülő madár (és rovar) egy teljes szárnycsapása két részből áll (1. ábra): az első részben lefelé csap a szárny, aminek hatására emelkedik a madár, a második részben pedig a szárny fellendül.

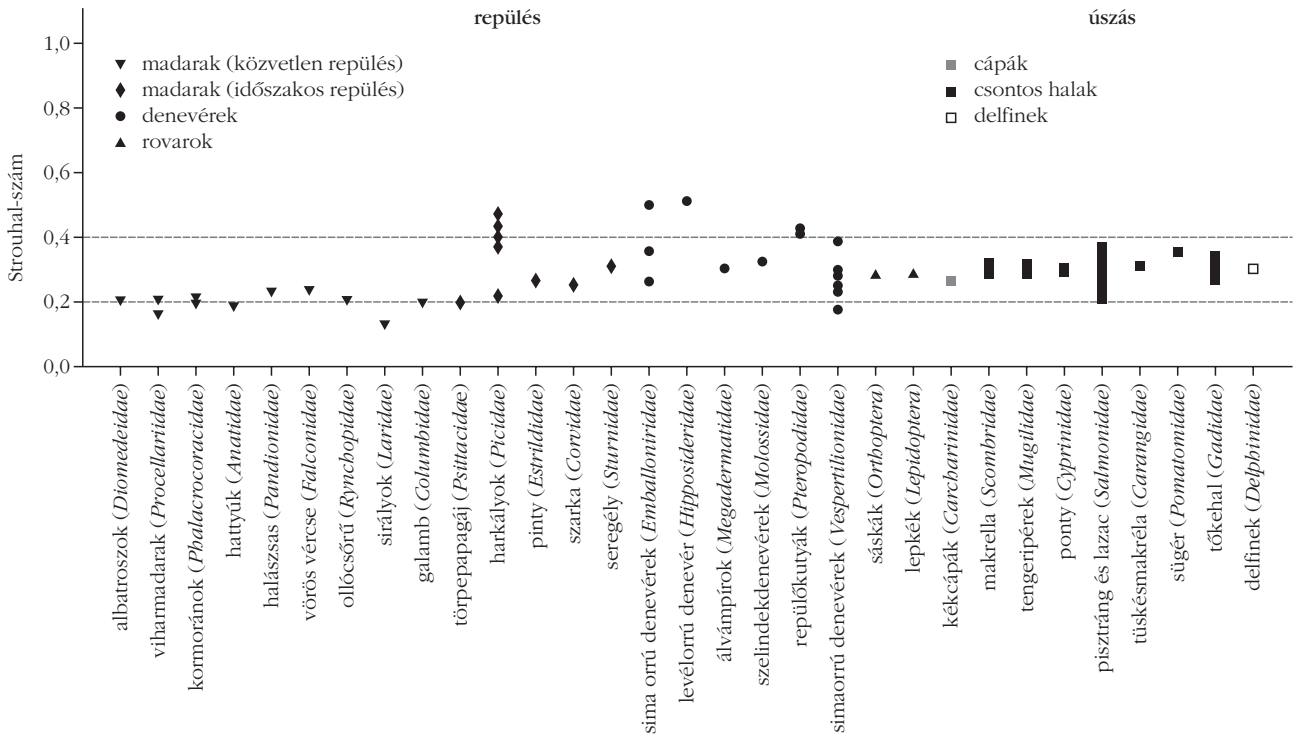
Az L szárnyfesztávolság a szárnyrezegetés amplitúdója, ami a szárny legfelső és legalsó állásában a szárnyvég helyének függőleges távolságát jelenti (2. ábra). Különböző madár-, és rovarfajok eltérő szögkitéréssel mozgatják szárnyaikat repülés közben. A madarak és rovarok teste természetes módon süllyed vagy emelkedik minden szárnycsapás közben, ami megfelel egy hullámzó mozgásnak. Habár az eltérő fajok különböző csapkodó mozgásokat végeznek szárnyaikkal, a szóban forgó hullámformák lehetővé teszik eltérő madárfajok repülési szokásainak összehasonlítását.

A madarak és a rovarok v repülési sebességét a szárnycsapkodás f frekvenciája és L amplitúdója egy viszonylag szűk tartományra korlátozza. Ezt a tartományt a mértékegység nélküli S Strouhal-számmal szokás jellemezni:

$$S = \frac{fL}{v},$$

ami a biomechanikában – a Kármán-féle örvényhez hasonlóan – a szabályozott örvénysorozatok növekedését és csökkenését határozza meg [1].

Taylor és munkatársai [1] a Strouhal-számot 42 különféle, normál sebességgel repülő madárra, denevérra és rovarra (valamint halra, delfinre) határozták meg. Azt kapták,



3. ábra. 42 madárfaj, denevér és rovar (valamint halak, delfinek) Strouhal-száma kitaró repülés (úszás) közben. Látható, hogy $0,2 < S < 0,4$ [1]. A röpsességhez közel (4-6 m/s) az álvámpír (*Megadermatidae*) Strouhal-száma $0,17 < S < 0,22$ értéktartományba esik, amely kapcsolatban van a hatékonyabb szárnymozgással. A harkályfélék (*Picidae*) magas Strouhal-értéke ($0,35 < S < 0,5$) ugyancsak a szárnymozgásra vezethető vissza. A sirályfélék (*Laridae*) alacsony Strouhal-száma azzal magyarázható, hogy a levegőben alapvetően inkább siklómozgást végeznek.

hogy Strouhal-szám csaknem mindig a 0,2–0,4 közti tartományba esik (3. ábra). Rohr és Fish [2] kiterjedtebb méréseket végeztek San Diegóban és a pennsylvaniai West Chesterben halakon, cápákon, delfineken és bálnákon. A megvizsgált vízi állatok nagy részének (44%) Strouhal-száma a 0,23–0,28 tartományba esett, de a többi is – a repülő állatokhoz hasonlóan – 0,2–0,4 között volt. Taylor és munkatársai [1], valamint Rohr és Fish [2] által a madarak röppályáján számolt Strouhal-számok (0,2–0,4) jól jellemzik a hatékony mozgássebességet hosszú távú, kitaró repüléskor (4. ábra).

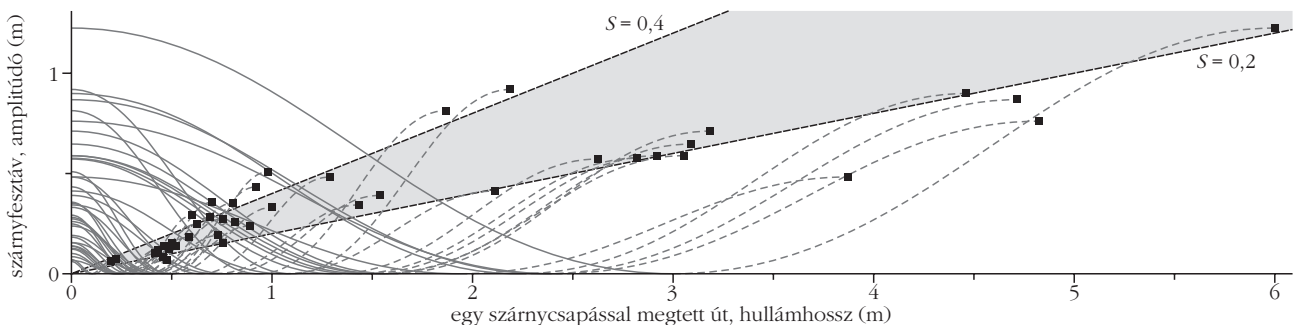
Annak érdekében, hogy Taylor és munkatársai [1], valamint Rohr és Fish [2] Strouhal-értékeit kiegészítsem, a 2013 májusában és júniusában a dunai árvíz idején emberközébe került 9 különféle vízimadárfaj (a bakcsó képét az 5. ábra mutatja) Strouhal-számát

határoztam meg, valamint a Kárpát-medencében nagyon gyakori nyolc szárnyas rovarfajt vizsgáltam meg. E kilenc vizsgált repülő madár közül hat kifejezetten nyári, és három „őshonos” a Kárpát-medencében. E madarak paramétereit és Strouhal-számát az 1. táblázatban összesítettem.

A kapott Strouhal-számokat összevetve Taylor és munkatársai [1] S -értékeivel, kiderült, hogy azok nagyjából egyformák. Tehát a vizsgált madarak Strouhal-számai – az L szárnyfeszítvolságától szinte függetlenül – egy viszonylag szűk tartományba esnek.

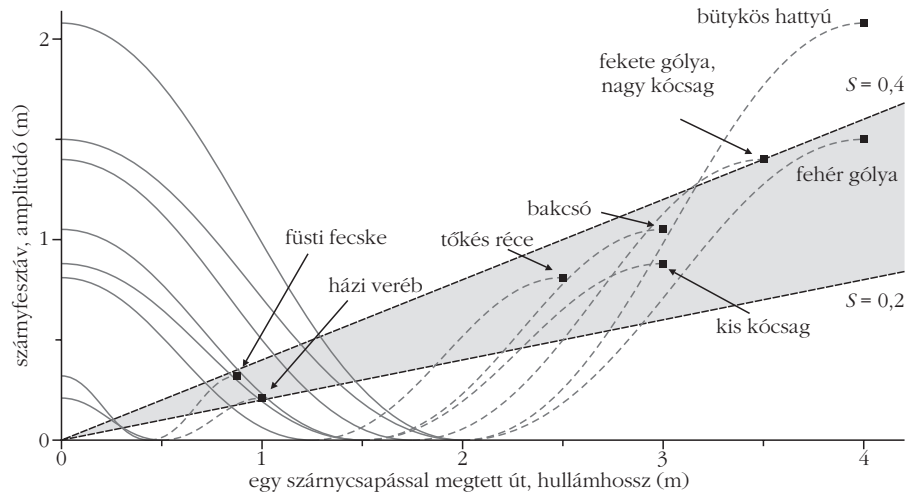
Az általam megfigyelt madarak repülési paramétereiből (L szárnyfeszítvolság, valamint f szárnycsapásfrekvencia és v sebesség) is elkészíthető a Strouhal-számot grafikusán megjelenítő, 4. ábrának megfelelő, szárnyfeszítv és az egy szárnycsapással megtett utat mutató 6. ábra.

4. ábra. 42 madárfaj, denevér és rovar Strouhal-számának grafikus meghatározása kitaró repülés közben. A Strouhal-szám a szárnyfeszítv és az egy szárnycsapással megtett út hányadosaként adódik. Jól látható, hogy a repülő állatok Strouhal-száma általában a 0,2–0,4 meredekségű egyenesek közé esik [3].





5. ábra. Egy bakcsó a Duna árterében (fotó: Hágen András, 2013).



6. ábra. Az általam megfigyelt kilenc madár Strouhal-számának grafikus meghatározása. A Strouhal-szám a szárnyfesztáv és az egy szárnycsapással megtett út hányadosaként adódik. Jól látható, hogy a madarak Strouhal-száma – a szárnyához képest nagy testű bütykös hattyú kivételével – a 0,2–0,4 meredekségű egyenesek közé esik.

1. táblázat				
A vizsgált – főleg vízi – madarak paraméterei és Strouhal-száma				
madárfaj	szárnycsapás/ másodperc $f(1/s)$	szárnyfesztávolság $L(m)$	röppebesség $v(m/s)$	Strouhal-szám S
bütykös hattyú (<i>Cygnus olor</i>)	~1,5	2,08	~6	0,52
fehér gólya (<i>Ciconia ciconia</i>)	~2	1,50	~8	0,37
fekete gólya (<i>Ciconia nigra</i>)	~2	1,40	~7	0,40
nagy kócsag (<i>Egretta alba</i>)	~2	1,40	~7	0,40
bakcsó (<i>Nycticorax nycticorax</i>)	~2	1,05	~6	0,35
kis kócsag (<i>Egretta garzetta</i>)	~2	0,88	~6	0,29
tőkés réce (<i>Anas platyrhynchos</i>)	~2	0,81	~5	0,32
füsti fecske (<i>Hirundo rustica</i>)	~8	0,32	~7	0,36
házi veréb (<i>Passer domesticus</i>)	~8	0,21	~8	0,21

A szerző megfigyelései (f , v) a 2013. május-júniusi dunai árvíz idején történtek a Bács-Kiskun megyei Dunafalva és Szeremle közötti 9 km hosszú Duna-szakaszon. Az L szárnyfesztávolság numerikus adatai a Világhálóról (Wikipedia) származnak.

2. táblázat				
Nyolc vizsgált rovarfajta fizikai paraméterei és a Strouhal-szám				
rovarfaj	szárnycsapás/ másodperc $f(1/s)$	szárnyfesztávolság $L(m)$	röppebesség $v(m/s)$	Strouhal-szám S
sávost szitakötő (<i>Calopteryx splendens</i>)	20	0,07	~4	0,35
szudétabögöly (<i>Tabanus sudeticus</i>)	100	0,03	~14	0,21
májusi cserebogár (<i>Melolontha melolontha</i>)	46	0,03	~4	0,34
fagyalszender (<i>Sphinx ligustri</i>)	72	0,08	~14	0,38
káposztalepke (<i>Pieris brassicae</i>)	12	0,04	~2	0,24
házi légy (<i>Musca domestica</i>)	100	0,008	~2	0,40
nyugati mézelő méh (<i>Apis mellifera</i>)	180	0,009	~4	0,40
gyűrűs szúnyog (nőstény) (<i>Theobaldia annulata</i>)	450	0,005	~6	0,37

A másodpercenkénti szárnycsapásokat és a röppebességet Greguss [4] vizsgálataiból kölcsönöztem, a szárnyfesztávolság numerikus adatait a világhálóról (Wikipedia) gyűjtöttem.

A Kárpát-medencei madárfajokat követően a *2. táblázatban* 8 rovarfaj Strouhal-számát határoztam meg. Ezen értékek is a 0,2–0,4 tartományba estek, bizonyítva a Strouhal-szám méretfüggetlenségét.

Taylor és munkatársai [1] kutatásukban azt kapták, hogy a kisebb madaraknak és rovaroknak eredendően nagyobb a meghatározott örvénylési sorozata, azaz Strouhal-száma, és csak akkor kisebb, ha szakaszos repülést, úgynevezett cirkáló repülést végeznek. Taylor és munkatársai [1] kutatása szerint az átlagos röptsebességgel utazó madarakat magasabb Strouhal-szám, míg a nagyon lassú utazósebességet alacsony Strouhal-szám jellemzi, hasonlóan például az *5. ábrán* a kis kócsag Strouhal-számához. A magas S érték-nél a repülő madár vagy rovar szárnya – felfelé történő mozgás közben – ütközik a légkörben kialakuló örvénnyel, amely hatásos energianyerési módot biztosít az élőlény számára a repüléshez.

Az optimális Strouhal-szám a szárny (uszony) kinematikai és morfológiai paramétereinek függvényében változik, de úgy tűnik, hogy a $0,2 < S < 0,4$ értékek általánosak. Ez széles körben igaz a repülő és az úszó állatokra.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszöni Horváth Gábornak (ELTE Biológiai Fizika Tanszék) a kézirat megírásában és pontosításához nyújtott segítségét.

Irodalom

1. G. K. Taylor, R. L. Nudds, A. L. R. Thomas: Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency. *Nature* 425 (2003) 707–711.
2. J. J. Rohr, F. E. Fish: Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans. *Journal of Experimental Biology* 207 (2004) 1633–1642.
3. <http://style.org/strouhalflight>
4. Greguss P.: Eleven találmányok. *Móra Ferenc Ifjúsági Könyvkiadó* (1978) 275.