

MADÁRTOLLAK HAJLÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

Dobránszky János¹, Szép Tibor², Bitay Enikő³¹MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport²Nyíregyházi Főiskola, Környezettudományi Intézet³Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Műszaki és Humántudományok KarDobranszky.Janos@cik.bme.hu**Absztrakt**

A cikk bevezetője áttekinti azokat a szempontokat, amelyeket a biológus kutatók fogalmaznak meg a madártollak hajlékonysági tulajdonságai vizsgálatára vonatkozóan. Ebből következik a kutatás célja: számszerűen meghatározni a partifecskek szélső faroktollának hajlékonysági tulajdonságait. A kísérleti programban 360 darab partifecske szélső faroktoll vizsgálatát végezték el a szerzők. A cikkben bemutatják a kétpontos hajlítóvizsgálat műszaki vonatkozásait, nevezetesen a vizsgálati feltételeket és az eredményeinek feldolgozására alkalmazható módszereket. Az erő-lehajlás diagramok felvételére, azok elemzésére és a tollak hajlékonyságának jellemzésére olyan módszereket ismertetnek, amelyek a szakirodalomban jelenleg alkalmazott módszernél érzékenyebben tárják fel az egyes tollak hajlékonyságában mutatkozó különbségeket.

Kulcsszavak: partifecske, madártoll, hajlékonyság, hajlítási merevség

Investigation of the flexibility of bird feathers**Abstract**

At first the paper describes the considerations and expectations, expressed by biologists as to why it is important for them to examine the flexural properties of bird's feathers. These aspects define the main objective of the research, namely, to quantitatively determine the flexural properties of the outer tail feathers of Sand Martin (*Riparia riparia*). There are carried out a series of tests of flexibility that includes bending test of 360 pieces of outer tail feathers. The authors describe the specific technical conditions applied for the two-point bending test, and the known and new methods for evaluating the test results. Such methods are also described by the authors to evaluate the bending force-deflection diagrams, which are more sensitive to reveal the really existing differences in flexibility, as the methods used until this.

Keywords: riparia, bird feather, flexural properties, bending stiffness

Bevezetés

A Magyarországon költő vonuló madarak az egyik leginkább veszélyeztetett fajcsoport, melynek tipikus képviselője a partifecske. Életmódját és a környezeti hatásoknak az arra való befolyását hosszú ideje kutatják.¹ A kutatások

elsősorban a biológiai tudomány eszközeinek alkalmazását kívánják meg, de olyan kérdések is felmerülnek, amelyeknek a megválaszolása mérnöki módszerek nélkül elképzelhetetlen.² A két szakma által közösen megválaszolendő egyik fontos kérdés az, hogy a madarak Afrikába és onnan vissza való költözésének, a több

ezer kilométeres távolság megtételének, hatalmas megterhelését mennyire határozza meg a madár tollazata, annak mechanikai tulajdonságai.³ E szempontból különös jelentőséggel bír a madarak tollazatának egyik meghatározó eleme, a szélső faroktoll. A szélső faroktoll mechanikai tulajdonságai, tartóssága, károsodással szembeni ellenállása döntően befolyásolja a madár célba érését.^{4,5}

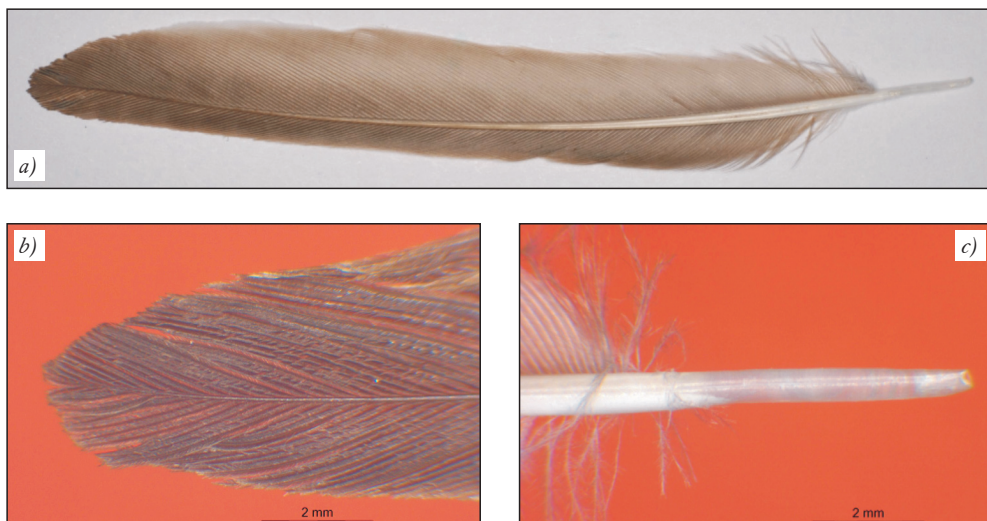
A Nyíregyházi Főiskola és a Magyar Madártani és Természetvédelmi Egyesület közösen tevékenykedő Riparia Ökológiai Kutatócsoportja az utóbbi két évtizedben, a madárgyűrűzések alkalmával, több száz szélső faroktollat gyűjtött a madarokból az Afrikában növesztett tollak kémiai és fizikai jellemzőinek vizsgálata céljából (az illetékes természetvédelmi hatóság engedélyével), amely tollvétel után a madarak szaporodását és túlélését illetően negatív hatást nem tapasztaltak.⁶ A közös kutatás célja az, ahogy ezeknek a tollaknak a mechanikai tulajdonságait átfogóan és az eddig fel nem tárt finom részletekbe menően meghatározzuk, és ezeket a műszaki jellemzőket felhasználjuk a partifecske egye-

dek pontosan ismert biológiai sajátosságainak elemzésében. Ebben a dolgozatban a 360 darab partifecske szélső faroktollon elvégzett hajlítóvizsgálat elsődlegesen műszaki vonatkozásait, nevezetesen a vizsgálati feltételeket és az eredményeinek feldolgozására alkalmazható módszereket tekintjük át.

A hajlékonyság vizsgálatának kísérleti feltételei

A kísérleti programban vizsgálni kívánt tollak hajlékonyságának mérése első megközelítésben egyszerűnek tűnő feladat, de azonnal szembesülünk a hiteles, objektív és ismételhető vizsgálati feltételek biztosításának nehézségeivel, ha figyelembe vesszük az 1. ábrán látható toll szerkezeti felépítéséből és anyagából adódó sajátosságokat. Csak a lényegesebbeket említjük meg:

- A tollgerinc síkban (és olykor térben is) görbült, keresztmetszete nem pontosan kör alakú, és ennek az átmérője folyamatosan változik.
- A cséve – a tollgerincnek a zászló alatti, pihementes része – sem pontosan kör alakú,



1. ábra. A T935806j jelű partifecske szélső faroktoll hossza 59,56 mm (a), a toll zászlójának csúcsa (b) és a cséve (c)

az átmérője ennek is változik, különösen a felső köldök környezetében, ahol a pihék megjelenése kezdődik.

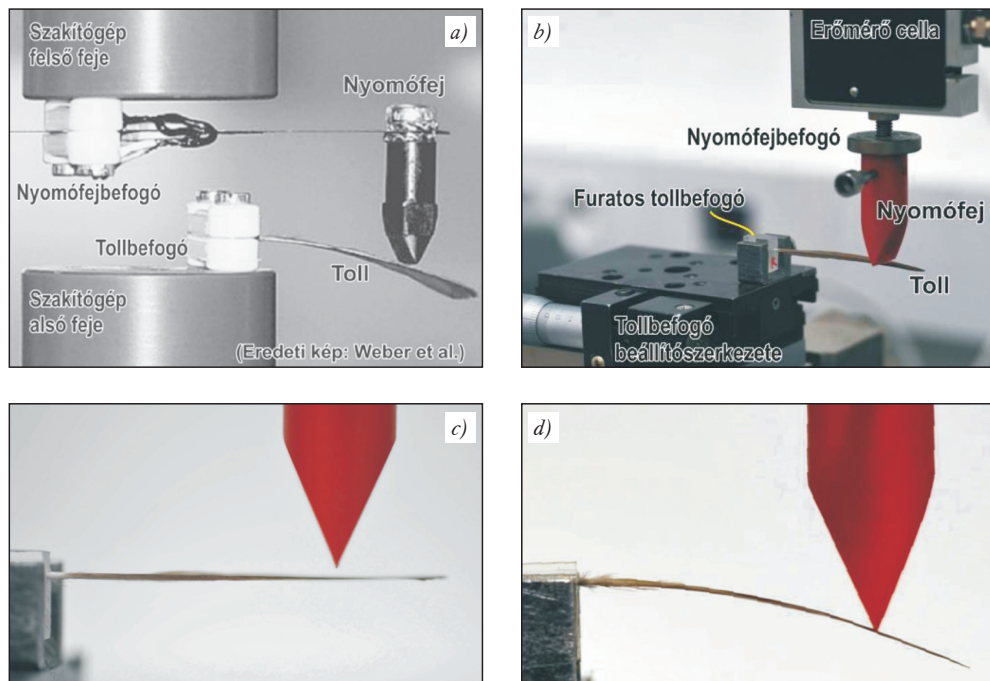
– A toll mérete és tömege kicsi, a gerinc és a cső jellegű cséve sérülékeny, a be- és megfogási lehetőségek definiálatlanok, a vizsgálati terhelés várható értéke nagyon kicsi.

A hajlékonyság vizsgálatára a műszaki gyakorlatban a legelterjedtebb módszer a két végpontján megtámasztott próbatestnek a támaszok között egy vagy két ponton ható nyomóterheléssel végzett hajlítása: a hárompontos, illetve a négyponos hajlítóvizsgálat. Bár a toll anyagával rokon műanyagok hajlékonyságának jellemzésére több szabványt is kidolgoztak – pl. az ISO 178 szabványt a műanyagok hajlítási tulajdonságainak meghatározása vagy az ISO 10619-es szabványsorozatot a gumi- és műanyag tömlők, csövek hajlékonyságának

és merevségének mérésére –, ezek nem nyújtanak támpontot, mivel meghatározott keresztmetszetű próbatestet feltételeznek.

A madártollak fentebb említett sajátosságai miatt a hajlékonyság vizsgálatára az egyik végén befogott konzoltartó lehajlását modellező vizsgálati módszert alkalmaztuk *Weber és szerzőtársai* ezzel foglalkozó, mértékadó kutatásához hasonlóan.⁷ A hajlítási kart (L) 35,0 mm értékre választottuk, amely az átlagos tollhosszúság kétharmada. A terhelési sebességet – alapos, a későbbiekben tárgyalt elemzés után – 5 mm/min értékre választottuk. A vizsgálatot ellenőrzött páratartalommal és hőmérsékleten végeztük, és minden tollat kétszer hajlítottunk ugyanabban a befogásban.

A vizsgálati feltételek egyik legkényesebb eleme a toll befogása. *Weberék* a 2.a ábrán



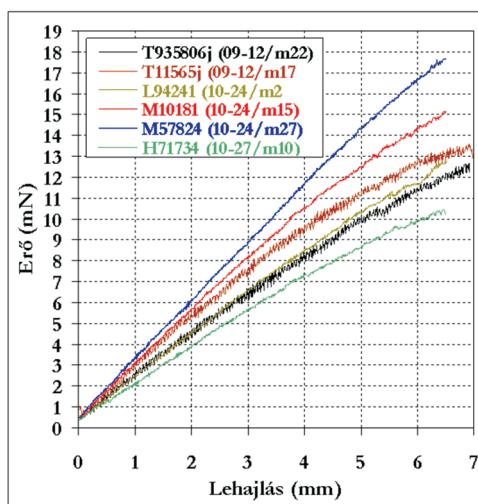
2. ábra. a) A Weberék által használt befogási rendszer: a nyomófej és a nyomófejbefogó között egy acéllemez teremt kapcsolatot, amelyre nyúlásmérő bélyeg van rögzítve; b) Az általunk alkalmazott befogási rendszer; c–d) A toll a hajlítókísérlet kezdetén és végén

látható befogást alkalmazták.⁸ Ez a szorító-fogás befogás kedvezőtlen, mind a toll, mind a nyomófej esetében. Az általunk alkalmazott befogási rendszerben – amely a 2.b ábrán látható – a nyomófej közvetlenül csatlakozik a Zwick 005 típusú szakítógéppel 20 N-os erőmérő cellájához. További lényeges része a befogási rendszernek a furatos tollbefogó, amely a körkörös szorítást és rögzítést biztosítja. Ebből egy készletet készítettünk, 0,55–0,70 mm átmérőjű furatokkal, és minden toll befogásához az adott toll csévéjének megfelelő méretűt használtuk. A toll befogását sztereomikroszkópos megfigyeléssel végeztük. A furatos tollbefogót a beállítószerkezetbe betétként lehet rögzíteni, és szükség esetén ezzel korrigálható a tollgerinc térbeli ferdesége is annak érdekében, hogy a hajlítás mindig vízszintesen álló tollon (2.c ábra) kezdődjön. A befogófej nyomóéle és annak 45°-os hajlású lapjait simára políroztuk, ugyanis a hajlítás közben ezek csúsznak a toll zász-lóján és a tollgerincen (2.d ábra). Finombeállító szerkezettel biztosítható a hajlítás távolság pontos értéke.

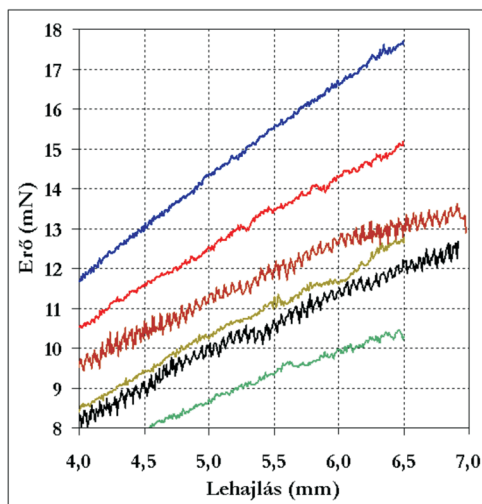
A hajlítóvizsgálat eredményei és azok értékelése

A partifecske szélső faroktollak hajlékonyságának vizsgálatát olyan lehajlásig (x) kívántuk végezni, amely kellően nagy igénybevételt jelent, de nem károsítja a tollat, számos (itt nem részletezhető) előkísérlet, különböző sebességekkel végzett ismételtetőségi vizsgálat után ezért az $L=35$ mm-es támaszközhez $x=6,50$ mm lehajlást választottunk. A 3. ábrán látható hat különböző madártoll teljes hajlítódiagramja, illetve annak a 4,0 mm lehajlás utáni szakasza kinagyítva. Szembeötlő az erő-lehajlás görbék „zajossága”: ez a nagyérzékenységű erőmérő cella által észlelt és regisztrált erőingadozás a nyomófej éle és a toll közötti súrlódással, valamint a zászoló egyes oldalágainak mikroelmozdulásaival magyarázható.

A hajlítás sebesség meghatározására elvégeztük egy adott madártollnak a különböző terhelési sebességgel való vizsgálatát a 2–100 mm/min tartományon. A 4. ábra mutatja az így



a)



b)

3. ábra. Hat partifecske jobb szélső faroktollának erő-lehajlás diagramja (támaszköz 35 mm, hajlítás sebesség 5 mm/min)

kapott eredményeket, látható, hogy az erő-lehajlás diagram – a legkisebb terhelési sebesség enyhe eltérésétől eltekintve – gyakorlatilag független a terhelési sebességtől, ezért a szakmában referenciának számító Weber–Borguud-féle vizsgálatban választott 2 mm/min sebességet megnöveltük 5 mm/min-re. Ugyanakkor a maximális lehajlást is megnöveltük 6,0-ról 6,5 mm-re, amelytől a tollak közötti eltérés jobb megjelenítését vártuk.

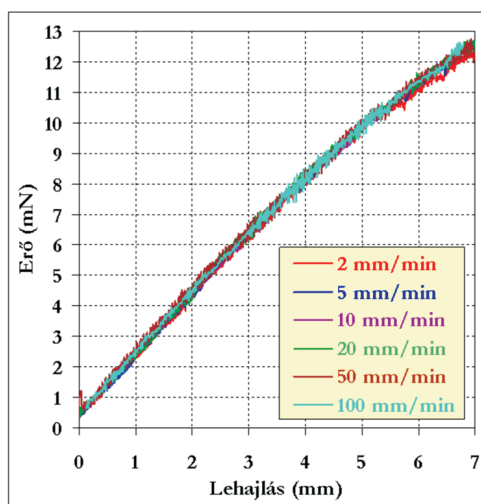
Az egész kísérleti program fő célja az volt, hogy a hajlítóvizsgálat elvégzésével nyert erő-lehajlás diagramok alapján számszerű értékeket nyerjünk a tollak hajlékonyságáról, mégpedig olyanokat, amelyek képesek érzékenyen jellemezni a kis eltéréseket is. Emiatt különféle értékelési módszerekre törekedtünk, amelyekről az eltérések pontosabb, finomabb „felbontását” vártuk, a madártoll-hajlékonysági vizsgálatokban referenciának számító, már sokat említett Weber-cikk értékelési módszeréhez képest. A lehetséges értékelési módszereket az alábbiakban sorra elemezzük.

1. módszer: A Weber–Borguud-módszer

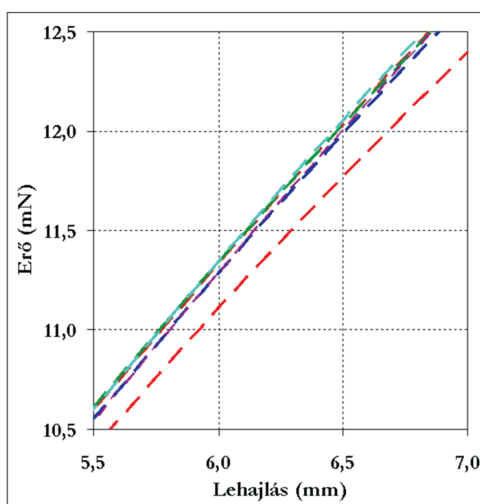
Az erő-lehajlás görbe regressziós egyenese meredekségét határozzák meg az $x=0-6$ mm lehajlítás tartományán, és ezzel minősítik a tollakat. Az így kapott értéket nevezik – nem éppen helyesen! – hajlítási merevségnek. Könnyű belátni, hogy e módszer eredménye kizárólag attól függ, hogy a 6 mm-es lehajlításnál mekkora az erő értéke, azt nem képes figyelembe venni, hogy miként alakul az erő változása a teljes korábbi terhelési folyamatban.

2. módszer: A kezdeti rugalmassági modulus és az érintőmodulus módszere

Bár a tényleges keresztmetszet és így a feszültség nem határozható meg, az erő és a feszültség egyenes arányossága miatt az erő-lehajlás görbével lényegében ugyanúgy bántunk, mintha az feszültséggörbe lenne. A kezdeti rugalmassági modulus, illetve az érintőmodulus mintájára meghatározható az erő-lehajlás görbe origóban, illetve a görbe tetszőleges pontjában vett meredeksége mint

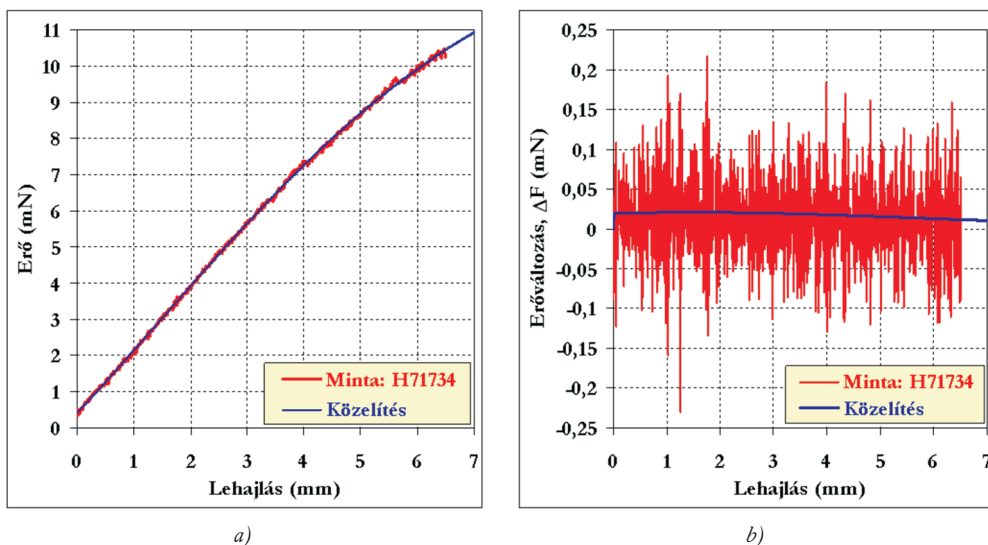


a)

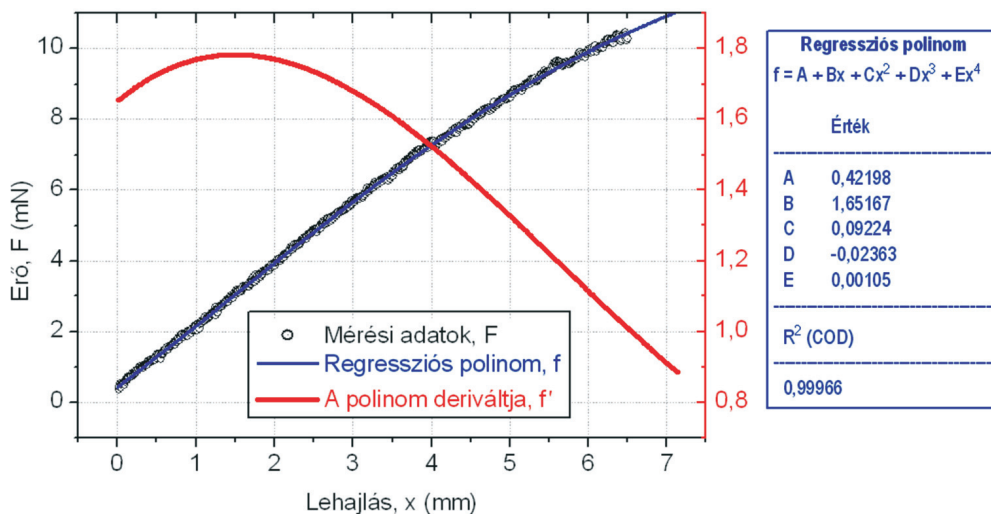


b)

4. ábra. a) A T935806j jelű toll erő-lehajlás diagramjai növekvő nyomófejssebességgel;
b) Az erő-lehajlás diagramok közelítő görbéi az 5,5 és 7,0 mm közötti lehajlástartományon



5. ábra. a) A H71734 jelű toll hajlítódíagramja és a mérési pontok közelítése negyedfokú polinommal;
 b) Az erő szekvenciális változása a mért adatok és a közelítő függvény bázisán



6. ábra. A H71734 jelű madártoll hajlítóvizsgálatával felvett mérési pontok közelítése negyedfokú polinommal és annak derivált függvénye

hajlékonysági jellemző. Ennek a módszernek a „nyers” alkalmazása azonban nem igazán célszerű, mivel egyrészt a nulla lehajlás környezetében nagy a mérés relatív hibája, másrészt pedig erősen ingadozik az erő a mérés során (lásd a 3. ábrát). Emiatt a mérési adatok-

ra előzetesen regressziós görbét kell illeszteni, esetünkben erre a negyedfokú polinom adta a legjobb illeszkedést az 5. ábrán látható eredménnyel. Az 5.a ábrán látható a mérési adatok és a regressziós polinom görbéje. Az 5.b ábra mindkét adatsorra nézve az erőváltozás érté-

két mutatja. A mérési adatokat tekintve előfordul 0,4 mN-t meghaladó erőváltozás is a 10 Hz-es mintavételezéssel – átlagosan 0,08 mm-es lehajlási elmozdulásonként – tett erőmérési adatokban. A regressziós polinom menete viszont szinte teljesen monoton.

Az itt tárgyalt módszer alkalmazásakor a regressziós görbe – $f(x)$ – meghatározása után meghatároztuk a regressziós polinom derivált függvényét – $f'(x)$ –, amely a 6. ábrán látható. Ez a derivált függvény kitűnő lehetőségeket kínál a tervezett cél, nevezetesen a hajlékonysági viselkedés finomságainak jellemzésére, ugyanis értékeiből meghatározható például:

- a derivált függvény kezdeti értéke az $x = 0$ helyen,
- a maximuma és a maximumához tartozó lehajlás,
- tetszőleges lehajláshoz tartozó értéke,
- értékének két tetszőleges lehajlásérték közötti változása.

3. módszer: A húrmodulus módszere

A rugalmassági és hajlékonysági tulajdonságok meghatározására a nem egy ponthoz kötött (mint amilyen a kezdeti rugalmassági modulus és az érintőmodulus), modulus vagy merevség jellegű anyagvizsgálati mérőszámokat általában olyan alakváltozási intervallumon értelmezik, amelynek alsó határértéke mindenkor nagyobb nullánál. Ennek az az oka, hogy valós mérési körülmények között a nulla közeli alakváltozásoknál az erő mérése nagyon pontatlan. A mi méréseinkben ezért eleve 0,5 mN-hoz kötöttük a mérési adatok rögzítésének kezdeti határértékét.

A fentebb említett 1. módszer a húrmodulus módszer talán legegyszerűbb alapesetének tekinthető. A madártollak közötti finom különbségek jobban kiemelhetők, ha a hűrt a mérési adatok regressziós függvényének arra

a két pontjára fektetjük, amely pontokban a hozzájuk húzott érintők meredekségkülönbségének a maximumát kapjuk. A 6. ábrán látható, hogy két tetszőleges pontba húzott érintő meredekségkülönbségének maximuma nem a függvény két szélső pontja között adódik, hanem az abszolút maximum és az abszolút minimum között.

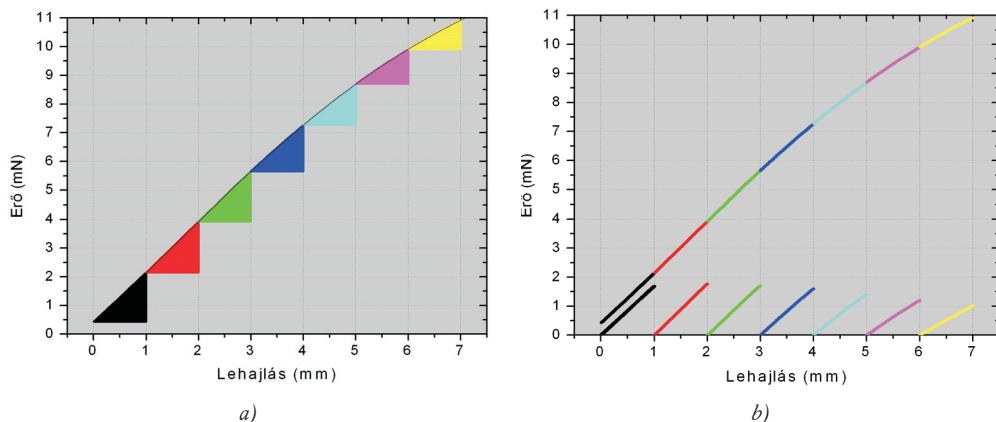
Természetesen ez esetben sem határozható meg a modulus, mivel a feszültséggörbe nem állítható elő, csak az erőváltozás ismert.

4. módszer: A hajlítási merevség meghatározásának módszere

Az egyik végén befogott konzoltartók lehajlását (x) a tartók statikájának módszereivel az erő (F), a hajlítási támaszköz (L), az anyag E rugalmassági modulusa és a keresztmetszet másodrendű nyomatéka (I) ismeretében egyszerűen számíthatjuk. A madártoll azonban az egyszerű konzoltartótól igencsak eltérő felépítésű szerkezet: nem állandó keresztmetszetű, anyaga nem homogén és nem izotrop, így a lehajlását analitikusan gyakorlatilag nem lehet számítási formulával leírni.⁹ Éppen ezért bármekkora pontatlanságot is jelent, ha a legegyszerűbb konzoltartó esetére vezetjük vissza a madártoll hajlítását, az ekkor használt egyszerű számítási képletek alkalmazása is célravezető lehet a madártollak hajlékonysági tulajdonságainak összehasonlítására, ugyanis a számítási képletekből kifejezhető $E \cdot I = F \cdot L^3/3x$ érték valódi – bár kétségkívül erősen leegyszerűsített módon meghatározott – hajlítási merevség.

5. módszer: Az erő-lehajlás görbe teljes vagy szakaszos integrálásának módszere

A 6. ábrán látható mérési adatokkal vagy az azokra illesztett regressziós polinommal dolgozva, a függvény integrálásával a teljes lehajlástartományra meghatározható a hajlítóerő



7. ábra. a) A H71734 jelű madártoll hajlítódigramjának egyenlő szakaszokra bontott regressziós görbéje a továbbhajlítási munkát jellemző, beszínezett területekkel; b) A továbbhajlítási erőnövekményt szemlélteti a hajlítódigram egyes szakaszainak nulla kezdeti értékre való redukálása

által a madártollon végzett teljes hajlítási munka. Ez a számítás egy tetszőleges lehajlástartományra is elvégezhető. Maga a teljes hajlítási munka nemcsak alkalmas, de kifejezetten ajánlott is a madártollak hajlékonyságának összehasonlítására. Az egyes mérési diagramok finom részletei jól felszínre hozhatók, ha a teljes görbét a 7.a ábrán látható módon, egyenlő lehajlástartományokra bontva, végezzük el az integrálást, és meghatározzuk az egyes szakaszokra az ún. továbbhajlítási munka értékeit, amelyeket az ábra külön beszínezve mutat.

Ugyancsak alkalmazható, a 7.b ábra szerint, az adott szakaszra a továbbhajlításhoz szük-

séges erőnövekmény, az ún. továbbhajlítási erő meghatározásának módszere. Ezek számszerű értékeit a H71734 jelű madártollra az 1. táblázat tartalmazza, grafikusan itt nem mutatjuk be ezeknek a változását, mivel teljesen hasonló jellegű görbéket adnak, mint a regressziós polinom derivált függvénye, amely a 6. ábrán látható.

Összefoglaló következtetések

A partifecske szélső faroktollak hajlékonyságának vizsgálatára alkalmazott kétpontos hajlítóvizsgálatok céljára új befogási rendszert dolgoztunk ki, amely biztosítja a cséve körös szorítását és a hajlítási távolság pontos

Lehajlástartomány (mm)	Teljes hajlítási munka (mN·mm)	Továbbhajlítási munka (mN·mm)	Továbbhajlítási erő (mN)
0–7	43,29719		
0–1	1,24641	0,83875	1,689
1–2	3,00693	0,88749	1,767
2–3	4,70444	0,8626	1,701
3–4	6,42712	0,81657	1,598
4–5	7,93923	0,72158	1,418
5–6	9,15232	0,61342	1,198
6–7	10,37186	0,51638	1,004

1. táblázat. A 7. ábra egyes tartományaira számított flexibilitási jellemzők értékei

beállítását. Az ismételhetőségi mérések kedvező eredményei alapján 6,0-ról 6,5 mm-re növeltük a szakirodalomból ismert lehajlítási mértéket, és 2 mm/min-ről 5 mm/min-re megnövelt terhelési sebességet alkalmaztunk. A hajlítódigramok értékelésére a következő módszereket ismertettük, amelyek mindegyike alkalmas arra, hogy a szakirodalomban referenciának számító módszerrel meghatározott hajlékonysági jellemzőnél részletesebb összehasonlítási lehetőséget nyújtson:

– a kezdeti rugalmassági modulus és az érintőmodulus módszere,

– a húrmodulus módszere,

– a hajlítási merevség meghatározásának módszere,

– az erő-lehajlás görbe teljes vagy szakaszos integrálásának módszere.

A 360 darab partifecske szélső faroktollon elvégzett hajlítóvizsgálatok eredményeit és azoknak a gazdamadarak biológiai jellemzőivel való kapcsolatát matematikai statisztikai elemzéssel feltáró sajátosságokat más közleményben ismertetjük.

IRODALOM

1. Szép T, Szabó DZ, Vallner J. Integrated population monitoring of sand martin *Riparia riparia* – an opportunity to monitor the effects of environmental disasters along the River Tisza. *Ornis Hung* 2003;12-13:169–82.
2. Beaufrère H. La plume et le vol. [PhD thesis.] Université Claude-Bernard – Lyon 1;2006.
3. Moller AP, Lope FD, Saino M. Sexual selection in the barn swallow *Hirundo rustica*, VI. Aerodynamic adaptations. *J Evol Biol* 1995 Nov; 8(6):671–87.
4. Dawson A, Hinsley SA, Ferns PN, Bonser RHC, Eccleston L. Rate of moult affects feather quality: a mechanism linking current reproductive effort to future survival. *P Roy Soc B-Biol Sci* 2000 Oct 22;267(1457):2093–8.
5. Chai P, Dudley R. Maximum flight performance of humming-birds: capacities, constraints, and trade-offs. *Am Nat* 2000;153:398–411.
6. Szép T, Hobson KA, Vallner J, Piper SE, Kovács B, Szabó DZ, Moller AP. Comparison of trace element and stable isotope approaches to the study of migratory connectivity: an example using two hirundine species breeding in Europe and wintering in Africa. *J Ornithol* 2009 Jul;150(3): 621–36.
7. Weber TP, Borgudd J, Hedenström A, Persson K, Sandberg G. Resistance of flight feathers to mechanical fatigue covaries with moult strategy in two warbler species. *Biology Letters* 2005 Mar; 1(1):27–30.
8. Borgudd J. Mechanical Properties of Bird Feathers – Influence of UV-Radiation and Mechanical Fatigue [dissertation]. Lund: Lund University; 2003.
9. Parkinson MB, Roach GM, Howell LL. Predicting the Large-Deflection Path of Tapered Cantilever Beam. *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando*. 2000. p. 1–11.

A szerzők köszönetet mondanak a BME Polimertechnika Tanszék laboratóriumában dolgozó mérnököknek a vizsgálatok elvégzésében való segítségükért. Bitay Enikő személyéhez kötődően a kutatás az EU és Magyarország támogatásával a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosítószámú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program” című kiemelt projekt keretei között valósult meg. A partifecske terepi vizsgálatait az OTKA T042879, K69068 pályázatai keretében zajlottak.

Dobránszky János

MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

H–1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Tel.: (+36) 1 463-1934