



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék  
Akusztikai és Stúdiótechnikai Laboratórium  
H-1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2.

Telefon: (36-1) 463-2543  
Telefax: (36-1) 463-3263  
E-mail: [rucz@hit.bme.hu](mailto:rucz@hit.bme.hu)  
URL: <http://last.hit.bme.hu>

# Reform fuvolafej akusztikai vizsgálata

Szakértői jelentés

Készítette: Dr. Rucz Péter



Budapest, 2017. április 28.

## 1. A vizsgálat bemutatása

### 1.1. A vizsgálat célja

A jelentésben bemutatott vizsgálatok célja a Megrendelő által fejlesztett és szabadalmaztatott reform fuvolafejek akusztikai tulajdonságainak objektív mérőszámokkal történő jellemzése és ezek összehasonlítása a hagyományos fuvolafej jellemzőivel. A vizsgálat megvalósításához különböző (hagyományos illetve reformfejjel összeállított) fuvolákon játszott hangokat és rezgéseket rögzítettünk kalibrált mérőműszerek segítségével, majd a rögzített hang- és rezgésmintákat a lent részletesen ismertetett módszerekkel elemeztük.

### 1.2. Környezet

- Helyszín: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Hálózati rendszerek és Szolgáltatások Tanszék (HIT), Akusztikai és Stúdiótechnikai Laboratórium, Felsőzabod hangterű mérőszoba (1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2., IE222 szoba)
- Időpont: 2017. január 17. 11:00–17:00 és 2017. március 7. 11:00–17:00
- Hőmérséklet: 23,5–25,0°C
- Résztvevők: Lakat Zoltán fuvolaművész, Rucz Péter villamosmérnök

### 1.3. Eszközök listája

- Trevor Cantabile fuvola, hagyományos illetve acél, cocobolo, csont, ezüst vagy titán hangolódugóval összeállítva
- 4 db TMS 130P10 1/4"-os kondenzátor mérőmikrofon (névleges érzékenység: 20 mV/Pa)
- 2 db PCB 353B13 rezgésérzékelő (névleges érzékenység: 5,1 mV/g)
- Larson–Davis CAL250 típusú hangnyomásszint-kalibrátor
- PCB 482A20 típusú mérőerősítő
- NI9234 adatgyűjtő modul
- HP laptop NiHu.Lab szoftverrel

### 1.4. Felvételek

A mérés során a hagyományos illetve ötféle reformfejjel (acél, cocobolo, csont, ezüst és titán hangolódugóval) összeállított fuvolákon játszott hangokat rögzítettük. Mind a hat fuvolaösszeállításán tartott hangokat, a fuvola teljes hangterjedelmében – a  $c'$  (egyvonalas  $c$ , a továbbiakban C1) hangtól a kromatikus skálán felfelé haladva a  $c''''$  (négyvonalas  $c$ , a továbbiakban C4) – *piano* és *forte* dinamikával megszólaltatva vettünk fel. Így összesen  $6 \times 37 \times 2 = 444$  hangminta került rögzítésre, minden hangminta az adott hang három egymást követő megszólalását tartalmazta.<sup>1</sup>

A megszólaló hangokat a fenti, kalibrált mérőmikrofonok segítségével alakítottuk elektromos jellé. A négy mikrofon pontos pozícióját az 1. ábrán bekarikázott számok mutatják. Az 1. mikrofont a befúváshoz közel, kb. 20 cm távolságban, míg a 2. mikrofont a nyitott végnél, hasonló távolságban helyeztük el. A 3. mikrofon a játékoskal szemben, míg a 4. mikrofon a játékos bal oldalánál helyezkedik el kb. 150 cm távolságra.

<sup>1</sup>Kivéve az ezüst dugóval ellátott fuvola H3 hangjának piano felvételét, mely csak kettő megszólalást tartalmazott.

Rezgésvételek készítésekor az 1. és 4. mikrofont két rezgésérzékelőre cseréltük, melyek elhelyezése a 2. ábrán látható. Mindkét gyorsulásmérőt viasszal rögzítettük a fuvola testéhez. Az 1. rezgésérzékelőt a fuvola nyitott végéhez közel, a nyitott végtől körülbelül 2 cm távolságra, míg a második rezgésérzékelőt a befúváshoz közel, attól nagyjából 5 cm távolságra helyeztük el. A rezgésérzékelőkkel összeállított mérésben nem rögzítettük az összes tartott hangot, csak az alábbiakat, *piano* és *forte* dinamikával: C1, E1, G1, C2, E2, G2, C3. A rezgésérzékelők és a mikrofonok jeleit azonos módon erősítettük és rögzítettük.

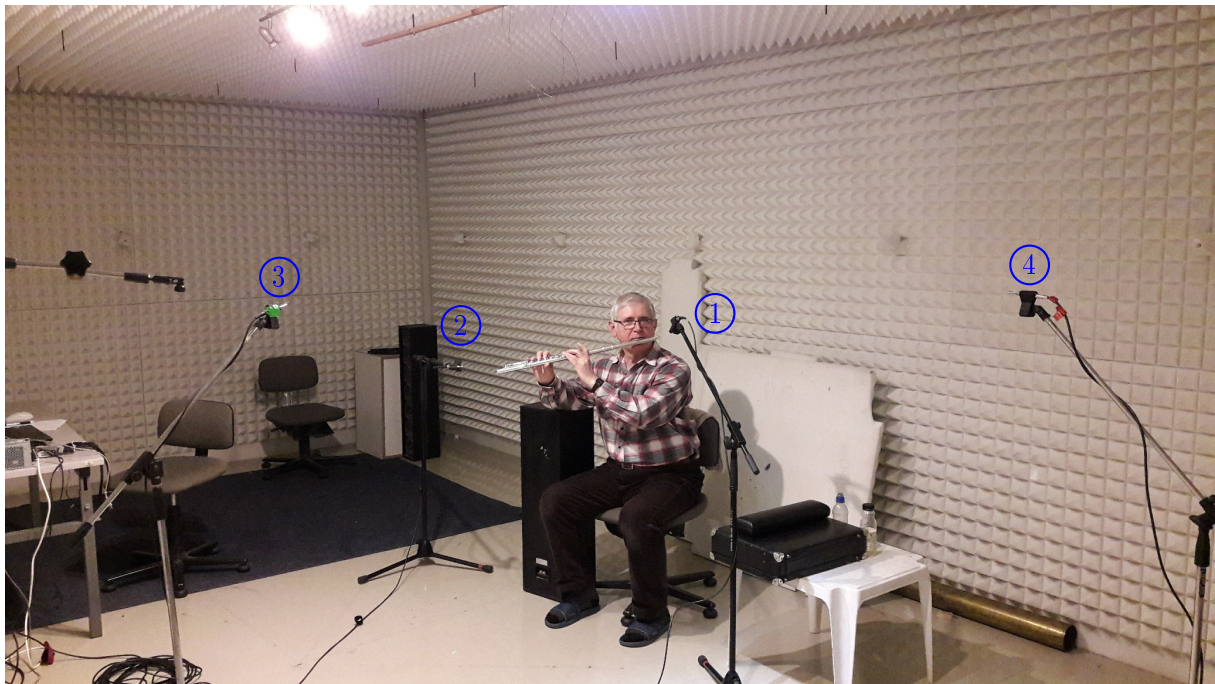
A megfelelő kivezélés érdekében a nyolccsatornás PCB mérőerősítőt alkalmaztuk. Az erősített jeleket az NI9234 mérésadatgyűjtő modul segítségével digitalizáltuk  $f_s = 51\,200$  Hz mintavételi frekvenciával. A digitalizált mintákat a NiHu.Lab mérőszoftverrel a számítógépen rögzítettük későbbi feldolgozásra. A rögzített minták mellett feljegyzések készültek a felvételek későbbi könnyebb feldolgozása illetve egyes törlendő megszólalások megjelölésére.

A tartott hangok felvétele mellett mind a hat különböző fuvolaösszeállítással rögzítettünk repetíciókat (az adott hangok egyre gyorsuló ismétlődéseit), a C1, E1, G1, C2 hangokon. Végül, későbbi felhasználás céljára mind a hat összeállítással rögzítésre került Ravel Bolero című darabjának fő motívuma.

## 2. A kiértékelés menete

A mérés kiértékelése a következő lépésekben történt.

1. A mért adatok betöltése a NiHu.Lab által rögzített formátumban és átalakítása `.wav` formátumra.
2. A feljegyzések alapján a megjelölt hangfelvételekből a törlendő részek kivágása.
3. A hangfelvételek szegmentálása. Minden hangfelvételben azonosítani kell a három egymást követő megszólalást, illetve a megszólaltatott hangokban pedig a berezgés (*attack*), állandósult állapot (*steady state*) és lecsengés (*decay*) fázisokat. A szegmentálás eredményét a 3. ábra szemlélteti. A szegmentáláshoz a jelet a feltételezett alappfrekvenciára hangolt két oktáv szélességű sávszűrővel szűrtük, majd a szűrt jel effektív értékének változása alapján detektáltuk a berezgés, állandósult állapot és lecsengés szakaszokat. A detekció egy programkód segítségével automatikusan történt, de annak eredményét minden felvételen külön ellenőriztük. A 3. ábrán látható, hogy a szegmentálás jó eredményt ad nagyon különböző megszólalások esetén is. Például az ábra alsó diagramján látható H3 hang esetében a második megszólalásnál a berezgés jelentősen lassabb, mint az első és harmadik megszólalásoknál, de az automatikus szegmentálás ezt az esetet is megfelelően kezeli.
4. Az állandósult állapotban a pontos frekvencia meghatározása. A pontos frekvencia mérése a jel állandósult állapotában egymást követő időablakokban történt. Az így megállapított frekvenciákból meghatározható az alaphang átlagos frekvenciája, illetve annak statisztikai jellemzői (szórás, kvartilisek) is.
5. A pontos frekvencia ismeretében a jel újramintavételezése. Az újramintavételezésnél a mintavételi frekvenciát ( $f'_s$ -t) úgy választjuk meg, hogy  $f'_s = N f_1$ , ahol  $N$  egész szám (esetünkben  $N = 64$ ),  $f_1$  pedig az alapharmonikus frekvenciája. Így az újramintavételezett jelen a spektrális elemzés koherens ablakokkal, a spektrális szivárgás (*spectral leakage*) és az ún. léckerítés-hatás (*picket fence effect*) nélkül végezhető el.

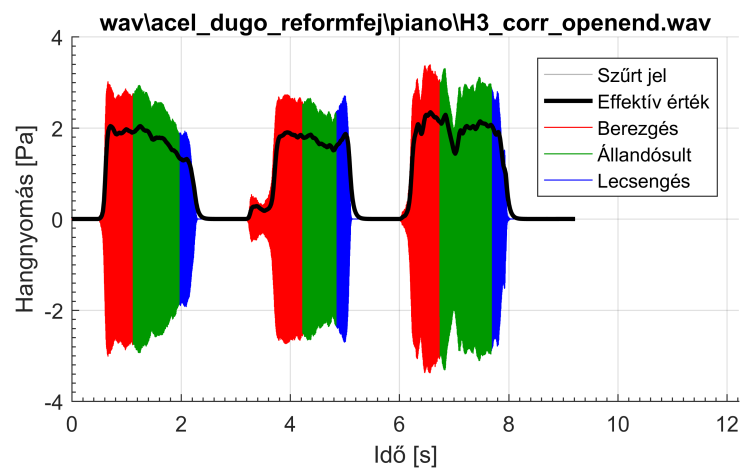
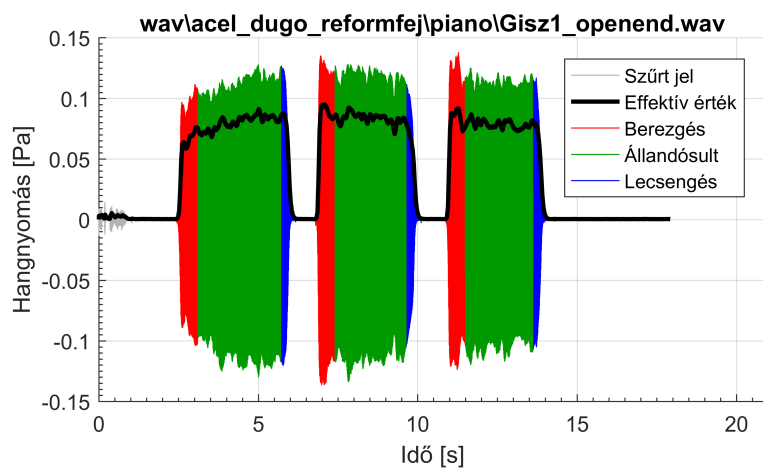


1. ábra. Mérési összeállítás a félszabad hangterű mérőhelyiségben





2. ábra. Rezgésérzékelők elhelyezése a fuvolán



3. ábra. A szegmentálás bemutatása két felvett hangmintán

### 3. Tartott hangok kiértékelése

#### 3.1. Hangmagasság vizsgálata

A hangmagasság kiértékelése a szegmentálás során meghatározott állandósult állapotú szakaszokon történt. Az állandósult szakaszt egymást követő időablakokra bontva részletes felbontással meghatározható a hang alapfrekvenciája. A vizsgálathoz az állandósult szakaszt  $N_{\text{win}} = 8192$  minta hosszúságú  $ol = 50\%$ -ban átfedő időablakokra bontottuk. Minden egyes időablakban lekeverés, szűrés majd harmonikus illesztéssel határoztuk meg az időablakban a hang alapfrekvenciáját. Így az alapfrekvenciát  $T_{\text{win}} = N_{\text{win}}/f_s \cdot (1 - ol) \approx 0,08$  s időbeli felbontással tudjuk vizsgálni. A felvett hangok állandósult szakaszában (a szakasz hosszától függően) 10–200 darab időablak volt felvehető. (A felső regiszterben tipikusan rövidebb volt az állandósult szakasz, mivel ezeket a hangokat nehezebb tartani az erős megfúvás miatt.) A teljes skálán átlagosan 100 feletti időablakot lehetett felvenni.

Az időablakonkénti mért frekvenciákat a 4. ábra mutatja a hat különböző fuvolafej esetében. A hangmagasságot az ábrán a felvett hangok időablakokban mért átlagos frekvenciájára a legkisebb négyzetes hibák módszerével illesztett temperált skálához képest ábrázoltuk. Mindegyik diagram az adott fuvolafejhez mért frekvenciákra illesztett skálához képest számított eltéréseket mutatja. A diagramokon a dobozokban vízszintesen húzott vastag vonal mutatja az átlagos frekvenciát, a dobozok alsó és felső élei a mért frekvenciák eloszlásának alsó és felső kvartiliseit, a dobozokkal összekötött, a dobozok alatt és felett vékony vonallal ábrázolt szintek pedig a mért minimum és maximum frekvenciát jelentik. Így a dobozok magassága (a mért frekvenciák normális eloszlását feltételezve) jellemzi a frekvenciák szórását, alacsonyabb doboz stabilabb hangmagasságot, magasabb doboz pedig kevésbé stabil hangmagasságot jelent az állandósult állapotban. Az ábrán jól látható, hogy a *piano* dinamikával játszott hangok átlagos frekvenciája legtöbb esetben az illesztett görbe alá esik, míg *forte* dinamika esetén ezek az értékek az illesztett görbe fölé esnek. Ez a tendencia megfelel a várakozásainknak, a jelenséget pedig a játszott hang frekvenciájának a megfúvás erősségétől való függése magyarázza.

#### 3.2. Hangnyomásszint vizsgálata

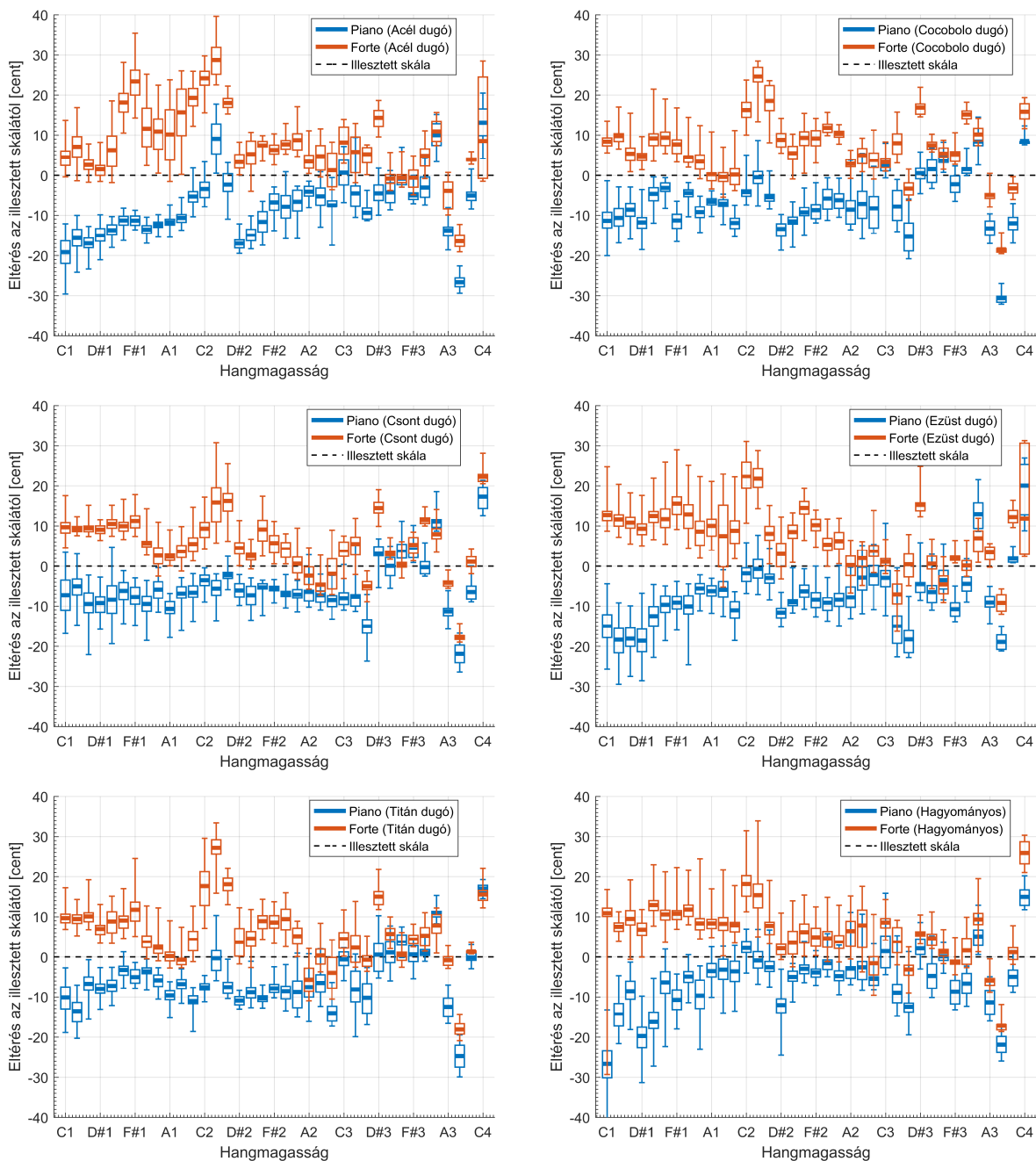
A hangnyomásszintet – a hangmagassághoz hasonlóan – az állandósult állapotban vizsgáltuk. A hangnyomásszint kiértékelése az újramintavételezett jelekből számított spektrumok alapján történt. Hasonlóan a hangmagasság számításához az állandósult állapotbeli újramintavételezett jelet időablakokra bontottuk, ezúttal az ablakhosszt 4096 mintának, az átlapolást pedig 85%-nak választottuk.<sup>2</sup> Érdemes megjegyezni, hogy ebben az esetben az újramintavételezésből adódóan az ablakok időbeli hossza az egyes hangmagasságok esetén eltérő. Ezzel a módszerrel átlagosan 100-as nagyságrendű időablakot kaptunk az állandósult szakaszban. Ezekből az ablakokból spektrumokat számítottunk, Hann-ablakfüggvénnyel súlyozva. A spektrumok alapján került meghatározásra a rögzített hangminták hangnyomásszintje.

A hangnyomásszint számításához szükséges a mikrofon érzékenységeinek pontos ismerete, melyet a mérés előtt elvégzett kalibrációval állapítottunk meg. A felvett hangok hangnyomásszintjét a spektrum alapján számítottuk, a hang harmonikusai teljesítményének összegzésével.<sup>3</sup> A hangnyomásszintet a  $p_{\text{eff}}$  effektív értékkel jelezett jelszint dB SPL (*sound pressure level*) mértékegységben kifejezett szintje adja meg, az alábbi formulával számítva

$$L \text{ [dB SPL]} = 20 \log_{10} \left( \frac{p_{\text{eff}}}{p_{\text{ref}}} \right), \quad \text{ahol } p_{\text{ref}} = 20 \mu\text{Pa}. \quad (1)$$

<sup>2</sup>Ezt a választást korábbi hangfelvételeken kiértékeléséből szerzett tapasztalatok indokolják. A 4096 mintás spektrumszámítás elegendő felbontást ad az újramintavételezésnek köszönhetően, a 85%-os átlapolás pedig az a tapasztalati felső határ, ami felett már a spektrális átlagolásból kapott zajnyomás nem növelhető tovább.

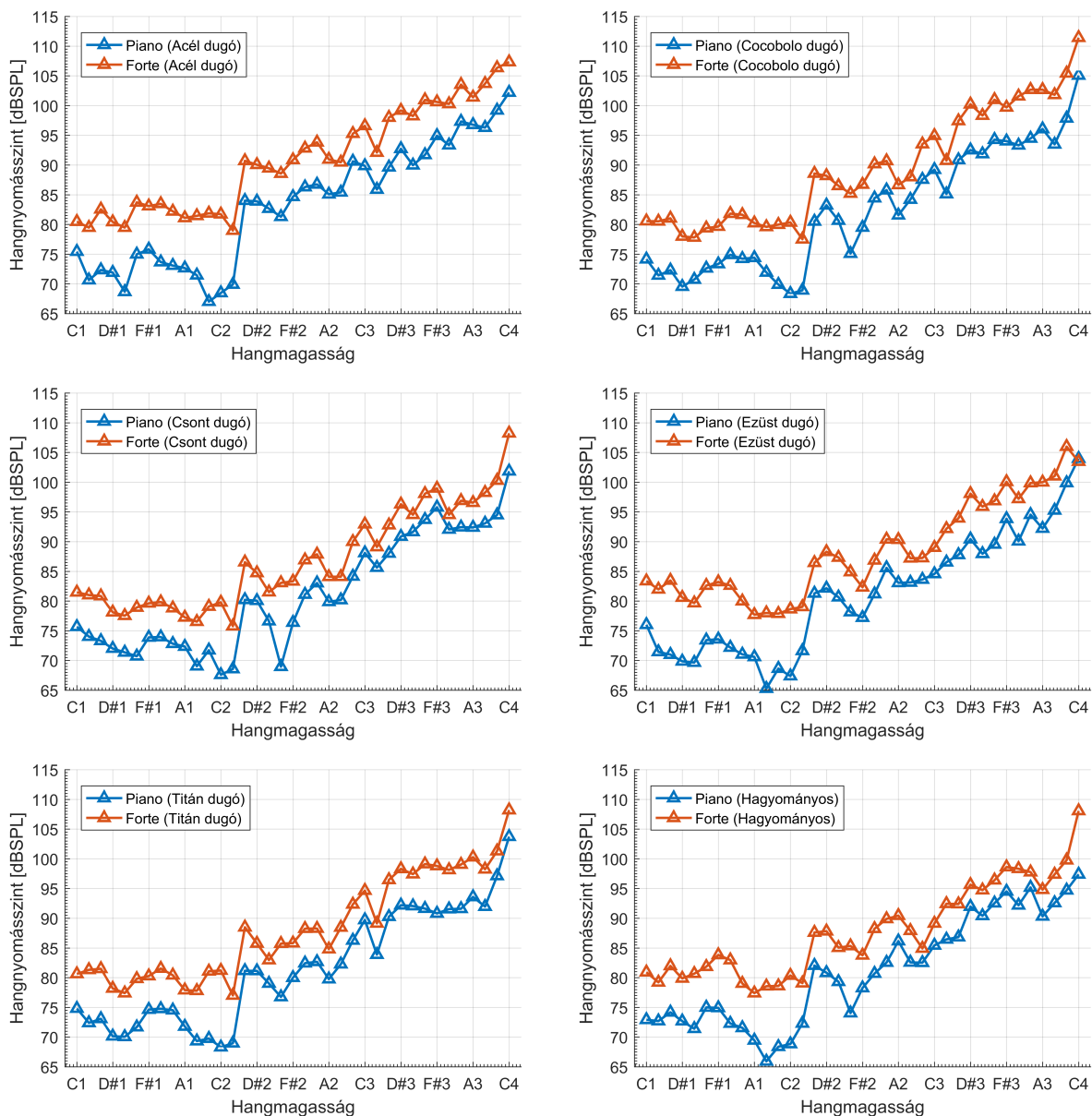
<sup>3</sup>Így a hasznos jelet terhelő szélessávú zaj teljesítményét nem számítjuk a jel teljesítményéhez. A mért spektrumok vizsgálata alapján zaj szintje legalább 60 dB-lel a jel szintje alatt van, így a zaj elhanyagolása nem befolyásolja jelentősen a számított hangnyomásszintet.



**4. ábra.** Tartott hangok mért hangmagasságai a teljes skálán. A hangmagasságot egy, a legkisebb négyzetes hibák módszerével illesztett, névleges temperált skálához képest vett, centben megadott hibával ábrázoljuk.

A különböző fejekkel összeállított fuvolákon *piano* és *forte* hangerővel játszott tartott hangok átlagos hangnyomásszintjeit az 5. ábra mutatja a hangszer nyitott végéhez közeli 2. mikrofon által rögzített jelekből számítva. Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a D2 hangtól kezdve a hangokat átfúvással kell megszólaltatni, az átfúvás pedig a hangnyomásszint értelemszerű emelkedéséhez vezet. Emiatt a C#2 és D2 hangok eredő hangnyomásszintje között minden esetben jelentős különbséget látunk.

Az 1. táblázat a mért eredő hangnyomásszinteket mutatja a fuvolán játszható háromoktávos tartományban *piano* és *forte* dinamikákkal a hat különböző fuvolaösszeállítás esetén. A teljes háromoktávos tartományt három regiszterre bonthatjuk az átfúvásokhoz tartozó hangoknak



5. ábra. A különböző fejekkel összeállított fuvolák mért hangnyomásszintjei a nyitott végnél

Dinamika	Piano [dB SPL]			Forte [dB SPL]			F–P arány [dB]		
	Alsó	Közép	Felső	Alsó	Közép	Felső	Alsó	Közép	Felső
Acél dugó	72.2	85.9	95.7	81.5	92.1	102.3	9.3	6.2	6.6
Cocobolo dugó	72.1	83.8	95.9	79.9	89.6	102.9	7.8	5.8	7.0
Csont dugó	72.2	81.5	94.0	79.0	86.8	98.8	6.8	5.3	4.8
Ezüst dugó	71.2	82.6	94.8	80.9	88.1	99.9	9.7	5.4	5.2
Titán dugó	72.0	82.8	94.4	79.9	88.5	100.2	7.8	5.7	5.9
Hagyományos	71.9	82.3	93.0	80.5	88.1	98.7	8.5	5.7	5.7

1. táblázat. Különböző fuvolaösszeállításokkal játszott tartott hangok átlagos hangnyomásszintjei a nyitott végnél a különböző regiszterekben. Alsó regiszter: C1–C#2, közép regiszter: D2–C#3, felső regiszter: D3–C4. Az „F–P arány” oszlop a *forte*–*piano* arányt jelenti.

megfelelően, így pedig a következő felosztást kapjuk. Alsó regiszter: C1–C#2, közép regiszter: D2–C#3, felső regiszter: D3–C4. A táblázatban szereplő dB SPL hangnyomásszintek a három regiszterre számított átlagos szintek. A táblázatban emellett feltüntettük a *forte–piano* arányt, mely a *forte* és *piano* dinamikával játszott tartott hangok átlagos hangnyomásszintjei különbségét jelenti. A táblázat alapján elmondható, hogy a különböző hangolódugókkal befolyásolható az egyes regiszterekben, különböző dinamikával játszott hangok hangnyomásszintje. Például az acél hangolódugó a közép és felső regiszterekben nagyobb hangnyomásszint megszólaltatását teszi lehetővé *forte* dinamikánál, mint a hagyományos hangolódugó, ugyanakkor az alsó regiszterben a *piano* dinamikával játszott hangok szintje nem változik számottevően a hagyományos hangolódugóhoz képest. Hasonló mondható el a cocobolo és titán hangolódugókról is. Az ezüst és acél hangolódugókról megállapítható, hogy a *forte–piano* dinamikaarány nagyobb, mint a hagyományos dugó esetén, különösen az alsó regiszterben.

### 3.3. Spektrális súlypont vizsgálata

A spektrális súlypont (*spectral centroid*) olyan jellemző, melyből a hangszínre lehet következtetni. Magasabb spektrális súlypont érték nagyobb felhangtartalmat jelent, míg alacsonyabb spektrális súlypont érték esetén a jelben az alaphang dominál.

A spektrum súlypontját az alábbi formulával kapjuk meg:

$$C(X) = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\text{harm}}} nX(nf_1)}{\sum_{n=1}^{N_{\text{harm}}} X(nf_1)}, \quad (2)$$

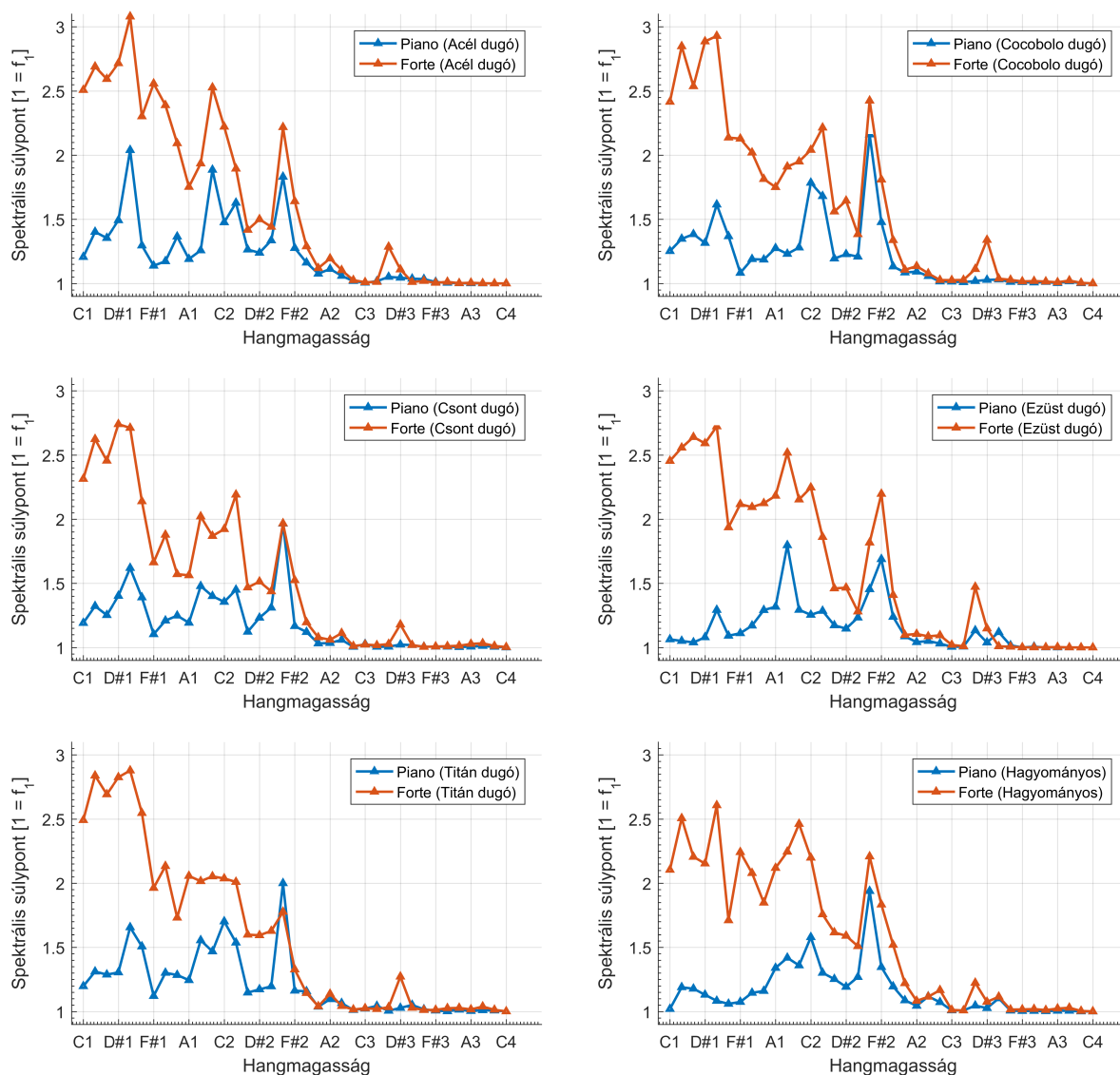
ahol  $C$  a spektrális súlypont,  $X$  a jel teljesítményspektruma,  $f_1$  a jel alaphangfrekvenciája,  $N_{\text{harm}}$  pedig a számításnál figyelembe vett harmonikusok száma. Jelen kiértékelésben az  $N_{\text{harm}} = 10$  értéket választottuk. A spektrális súlypont a (2) formula szerint dimenziótlan mennyiség, melyet frekvenciává a jel alaphangfrekvenciájával való szorzással lehet átváltani.

Különböző fuvolafejekkel felvett *piano* és *forte* dinamikával játszott tartott hangok spektrális súlypontjait a nyitott végnél a 6. ábra diagramjai mutatják. A *piano* és *forte* dinamikák esetén az adódó spektrális súlypontok jelentősen eltérőek, *forte* dinamika esetén a spektrális súlypont gyakorlatilag a teljes tartományon nagyobb értéket vesz fel, mint *piano* dinamikánál. Mindkét dinamikusint esetén jelentős eltéréseket tapasztalunk az egyes fuvolafejek között. Az acél, cocobolo és titán dugók a hagyományos fejhez képest magasabb súlypontot, vagyis nagyobb felhangtartalmat adnak. A csont, ezüst és hagyományos dugókkal játszott tartott hangok átlagosan hasonló felhangtartalommal bírnak az állandósult szakaszban. A spektrális súlypontok számszerűsített és az egyes regiszterekre véve átlagolt értékeit a 2. táblázat foglalja össze. A 6. ábrán az is észrevehető, hogy mindegyik fuvolafej esetében vannak olyan hangok, ahol a spektrális súlypont jelentősen megváltozik a szomszédos hangokhoz képest. Ilyen hang például az acél, cocobolo, csont, titán és hagyományos hangolódugók esetén az F2 hang, az ezüst hangolódugó esetében pedig az A#1 és F#2 hangok.

### 3.4. Állandósult állapotú spektrum vizsgálata

A különböző fuvolafejekkel felvett C1–G1 hangok állandósult állapotbeli spektrumát *piano* illetve *forte* hangerőnél a 7.–14. ábrák mutatják. A hangok választását az indokolja, hogy szubjektív tapasztalatok alapján ezeknél a hangoknál számíthatunk a legnagyobb különbségekre. Az ábrák diagramjai mind azonos skálán vannak ábrázolva a könnyebb összehasonlítás végett. Szintén a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében minden diagramon normalizált frekvenciaskálát használtunk, melynek 1 értéke minden esetben az egyes hangok alaphangfrekvenciájának megfelelő frekvenciát jelöli. (Így az alaphanghoz tartozó spektrumvonal mindig az 1 értékhez kerül, a





6. ábra. Spektrális súlypont a teljes játszható tartományban *piano* és *forte* dinamikával

Dinamika	Piano			Forte		
	Alsó	Közép	Felső	Alsó	Közép	Felső
Acél dugó	1.42	1.20	1.02	2.38	1.33	1.04
Cocobolo dugó	1.36	1.22	1.01	2.26	1.38	1.05
Csont dugó	1.33	1.17	1.01	2.12	1.28	1.03
Ezüst dugó	1.22	1.18	1.03	2.30	1.34	1.06
Titán dugó	1.39	1.18	1.01	2.31	1.28	1.04
Hagyományos	1.22	1.21	1.02	2.16	1.41	1.05

2. táblázat. Különböző fuvolaösszeállításokkal játszott tartott hangok átlagos spektrális súlypontjai a nyitott végnél a különböző regiszterekben. Alsó regiszter: C1–C#2, közép regiszter: D2–C#3, felső regiszter: D3–C4.

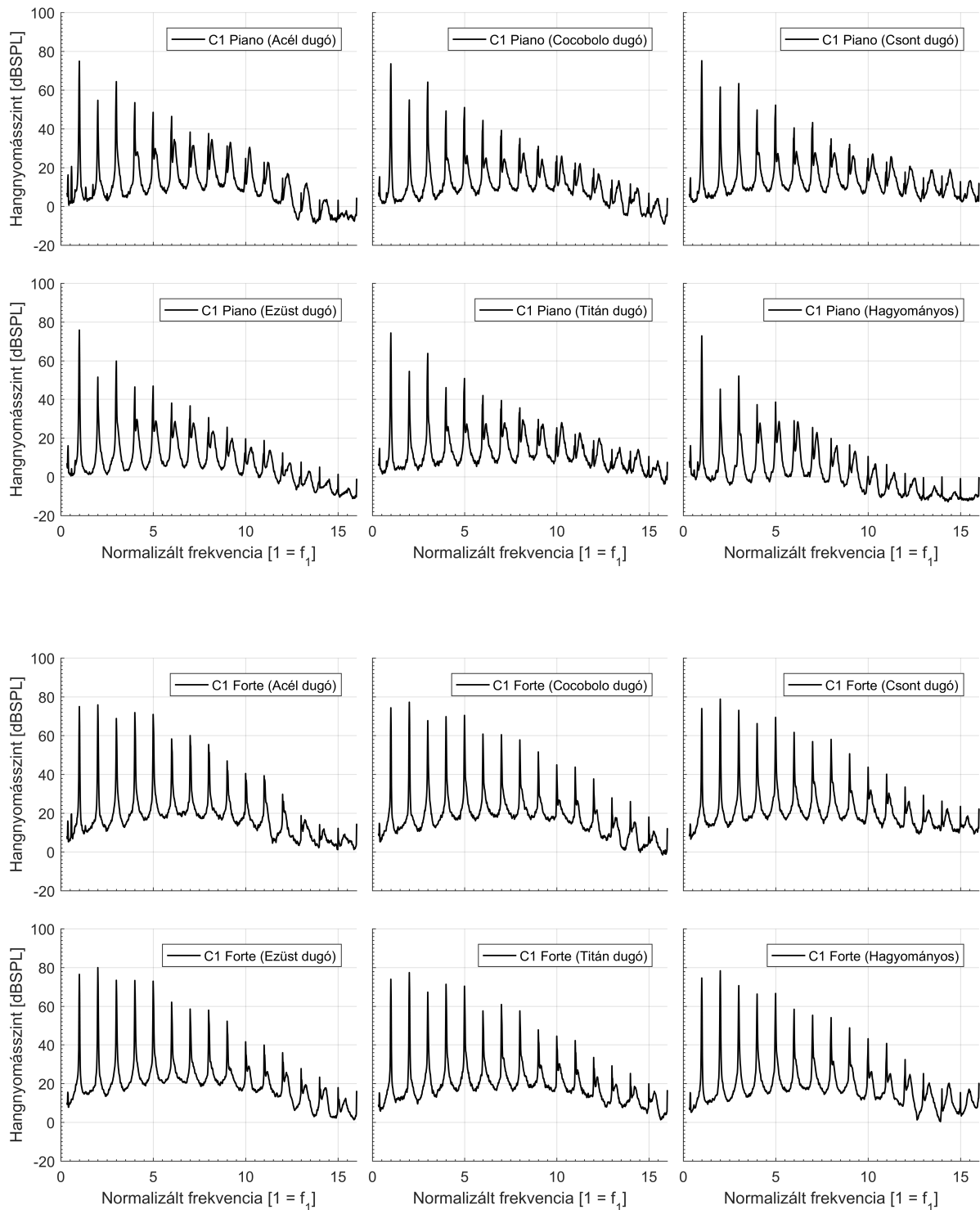
felhangok pedig rendre a 2, 3, 4 satöbbi dimenziótlan frekvenciákhoz.) Az ábrák első és második sorában lévő diagramokon a *piano*, harmadik és negyedik sorban pedig a *forte* dinamikával játszott hangok állandósult állapotbeli spektruma látható. Egy ábrára a zenei skála egy adott hangjához tartozó spektrumok kerültek. Minden esetben a három megszólalás állandósult állapotú amplitúdóspektrumának átlagértékét ábrázoltuk.

Minden diagramon jól megfigyelhetőek az alaphanghoz és a felharmonikusokhoz tartozó éles csúcsok. Az éles csúcsok mellett szintén megjelennek – főleg nagyobb frekvenciákon jól láthatóvá is válnak – a légoszlop sajátfrekvenciáihoz tartozó szélesebb csúcsok. A sajátfrekvenciák közös jellemzői a következők. 1) Az első néhány harmonikus esetében nagyon közel esnek a harmonikusokhoz, így nem lehet a harmonikusokat a sajátfrekvenciáktól elkülöníteni. 2) Magasabb frekvenciákon a sajátfrekvenciák csúcsai távolodnak a harmonikus csúcsoktól, ami a légoszlop effektív hosszának frekvenciafüggésének következménye. Ezt a jelenséget nyúlásnak (*stretching*) is nevezik. A jelenség a diagramokon jól megfigyelhető, a *piano* dinamika esetén a 4–5. felhangtól, *forte* dinamikánál pedig a 9–10. különíthetőek el jól a felhangok és a sajátfrekvenciák. 3) A sajátfrekvenciákhoz tartozó csúcsok magasabb frekvencián szélesednek, magasságuk pedig csökken. Ezt a jelenséget a hanglesugárzási és fali surlódási veszteségek magyarázzák. Elmondható, hogy a diagramokon megjelenített spektrumok összhangban vannak a fuvola fizikájáról alkotott, széles körben elfogadott modelltől következtethető fő jellemzőkkel.

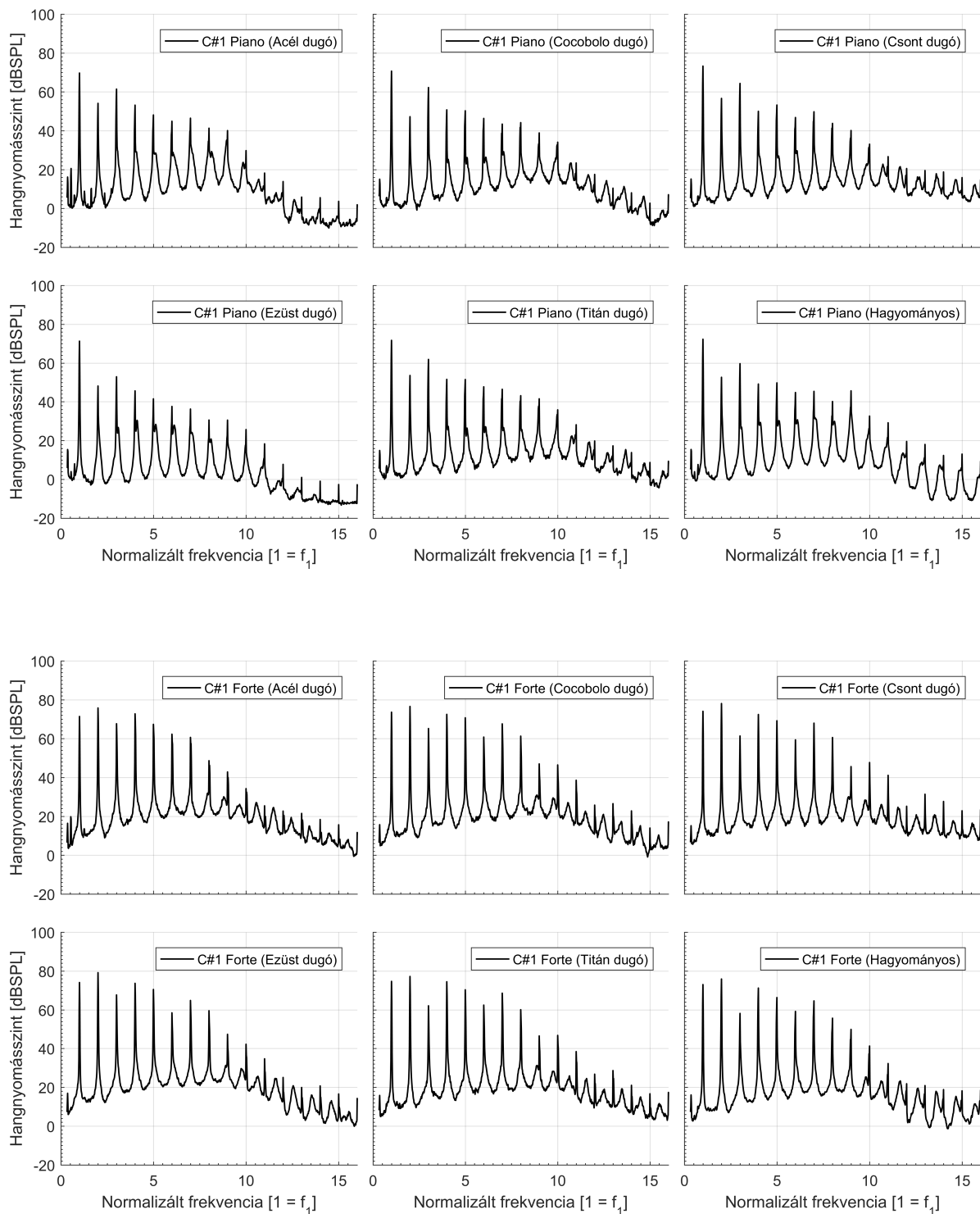
Az ábrázolt spektrumokon megfigyelhetőek az egyes fuvolafejekkel mért spektrumok közti különbségek is. Itt nem mutatunk be minden különbséget részletesen minden hangra, hanem az észrevehető fő különbségeket tárgyaljuk néhány példával bemutatva azokat. A fő megfigyelhető különbségek az alábbiak.

1. Egy-egy felhang amplitúdójának lényeges megváltozása különböző hangolódugók esetén. Például az F1 hangban *piano* dinamika mellett a második harmonikus amplitúdója jelentősen eltér a különböző hangolódugóknál. Az eltérés akár 20 dB is lehet, ami a cocobolo és hagyományos hangolódugó között figyelhető meg. *Forté* dinamika esetén például a G1 hang esetén figyelhetőek meg hasonló különbségek.
2. Legerősebb felhang megváltozása különböző hangolódugók esetén. Az egyes harmonikusok amplitúdójának megváltozása mellett megfigyelhető, hogy bizonyos esetekben a különböző hangolódugóknál eltérő lehet, hogy az állandósult hangban melyik harmonikus a legerősebb. Erre jó példa a *forte* dinamikával játszott D#1 hang. Ennél a hangnál a hagyományos hangolódugó esetében az alaphang, míg acél és ezüst dugóknál az oktáv a legerősebb komponens. Ugyanakkor a cocobo, csont és titán dugóknál a második és negyedik harmonikus közel azonos amplitúdóval vannak jelen.
3. A magasabb felhangok amplitúdójának együtt történő megváltozása. A magasabb (5–7. felhangok) amplitúdójában is különbségeket figyelhetünk meg, például a G1 hang esetén. Mind *piano*, mind *forte* dinamikánál ezek a felhangok jelentősen erősebben pl. az acél vagy cocobolo dugókkal, mint a hagyományos hangolódugóval. (Ez összhangban van a 6. ábrán és a 2. táblázatban megjelenített eredményekkel.)

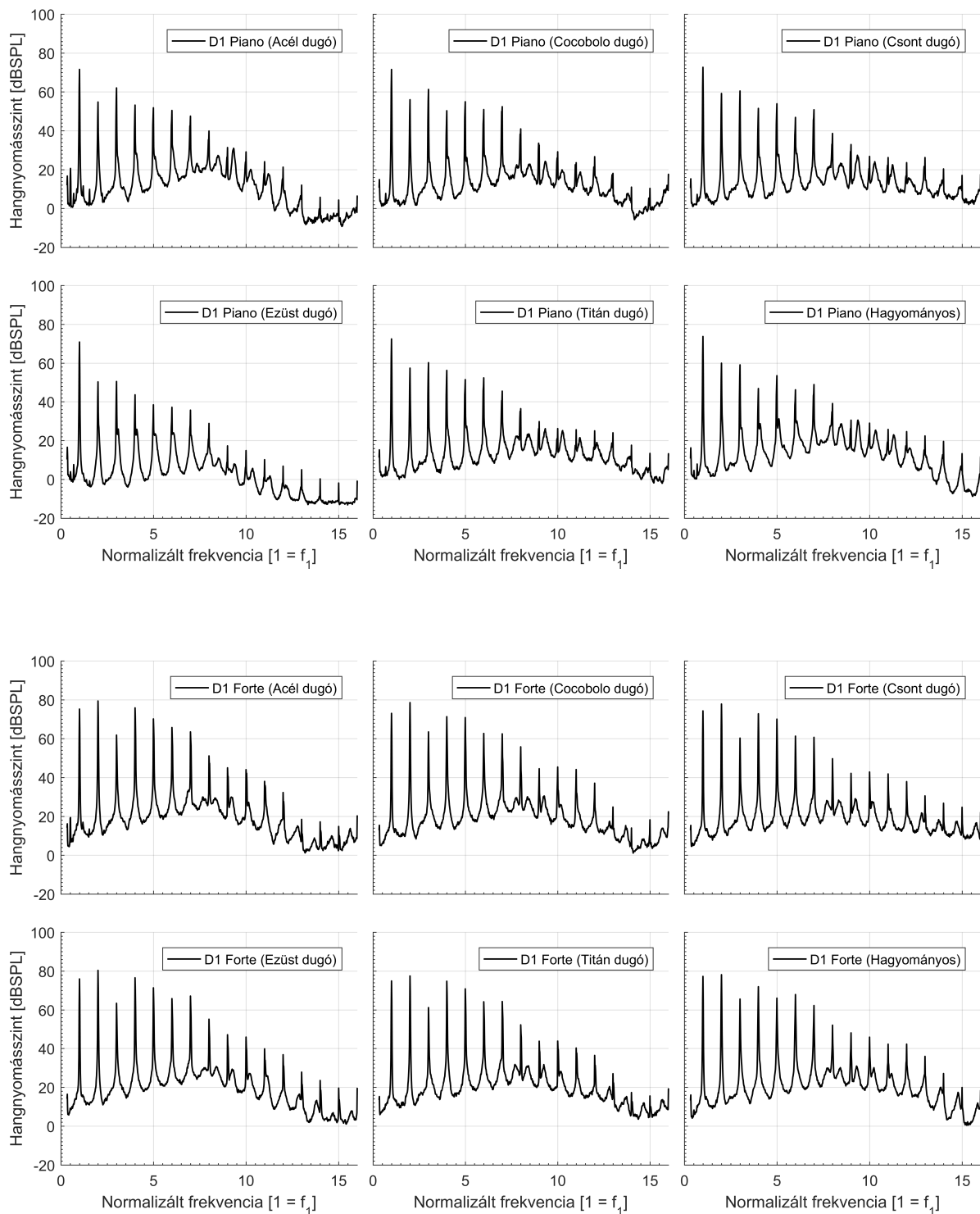
A harmonikusok amplitúdójának megváltozása befolyásolja az észlelt hangszínt. Bár szubjektív vizsgálatokat nem végeztünk, feltételezhető, hogy ezek az objektív különbségek az érzett hangminőséget is befolyásolják.



**7. ábra.** A C1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)

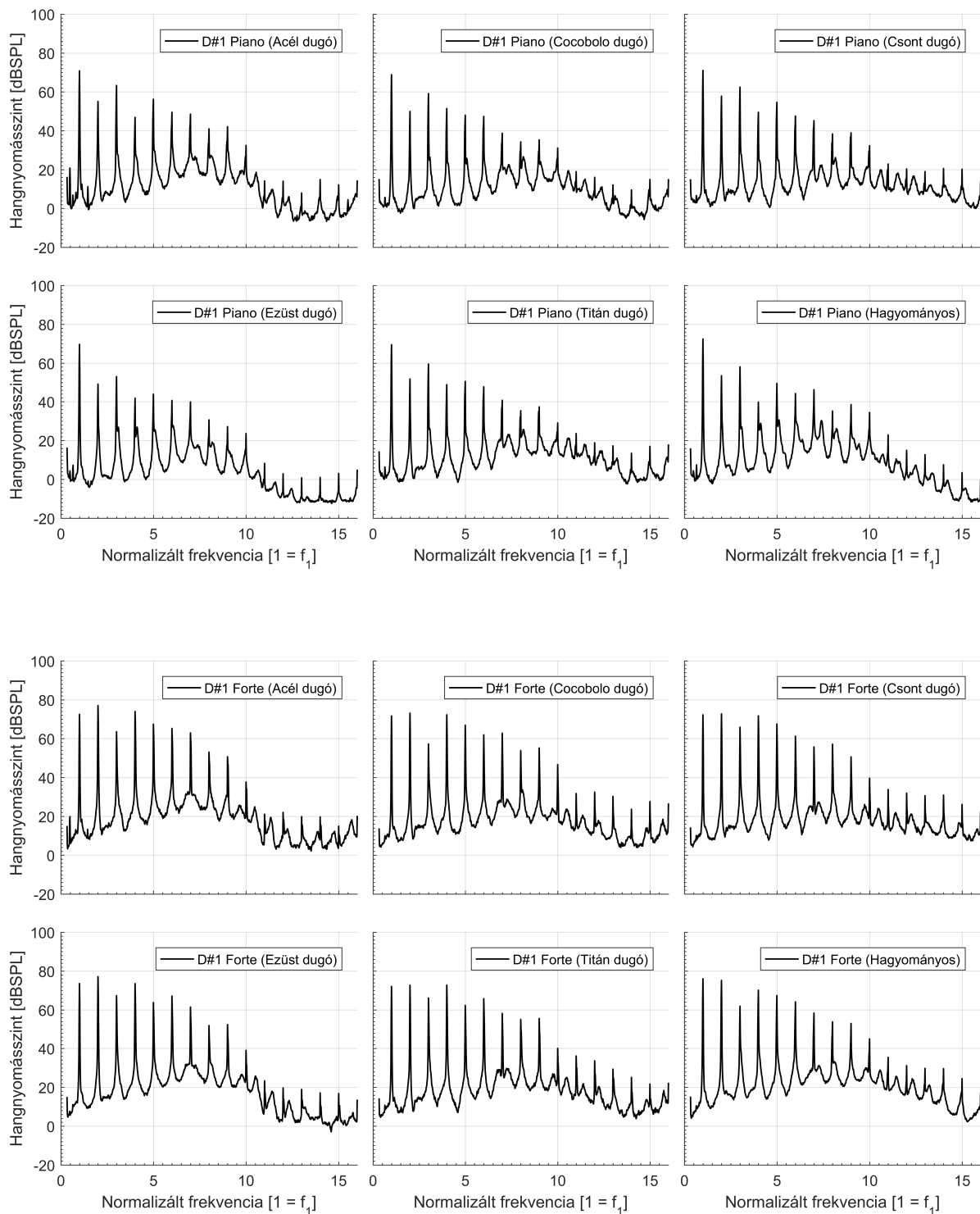


**8. ábra.** A C#1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)

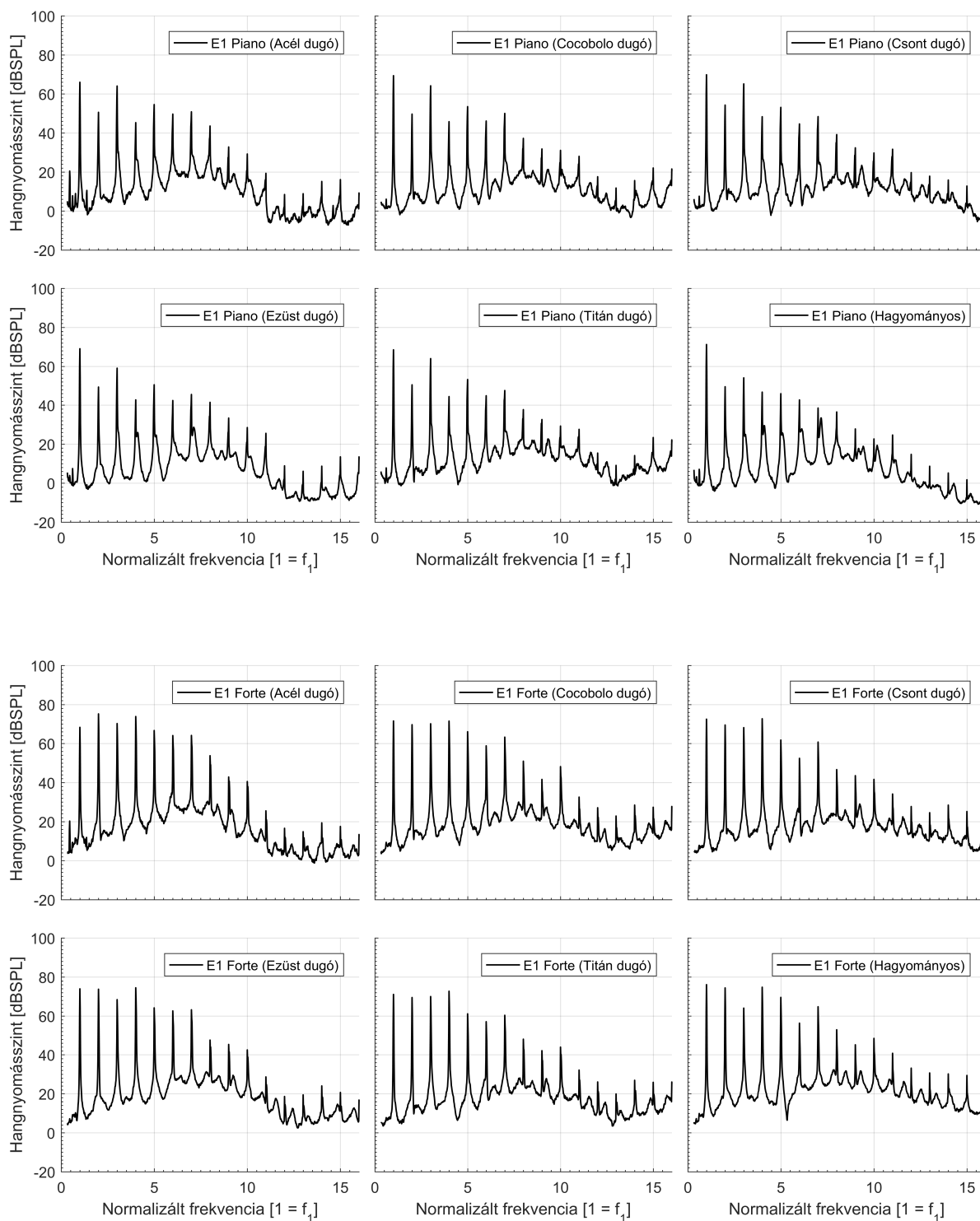


**9. ábra.** A D1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)

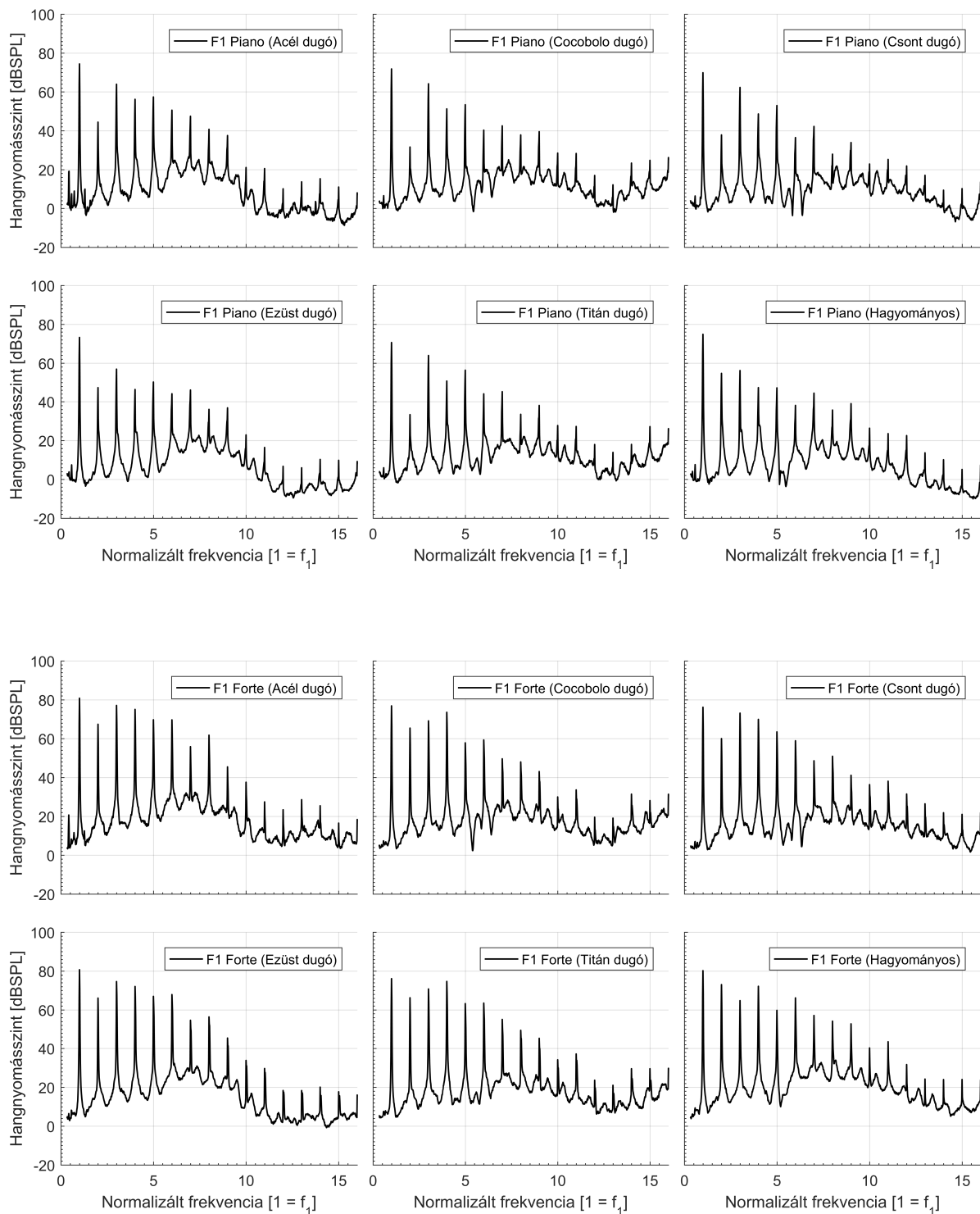




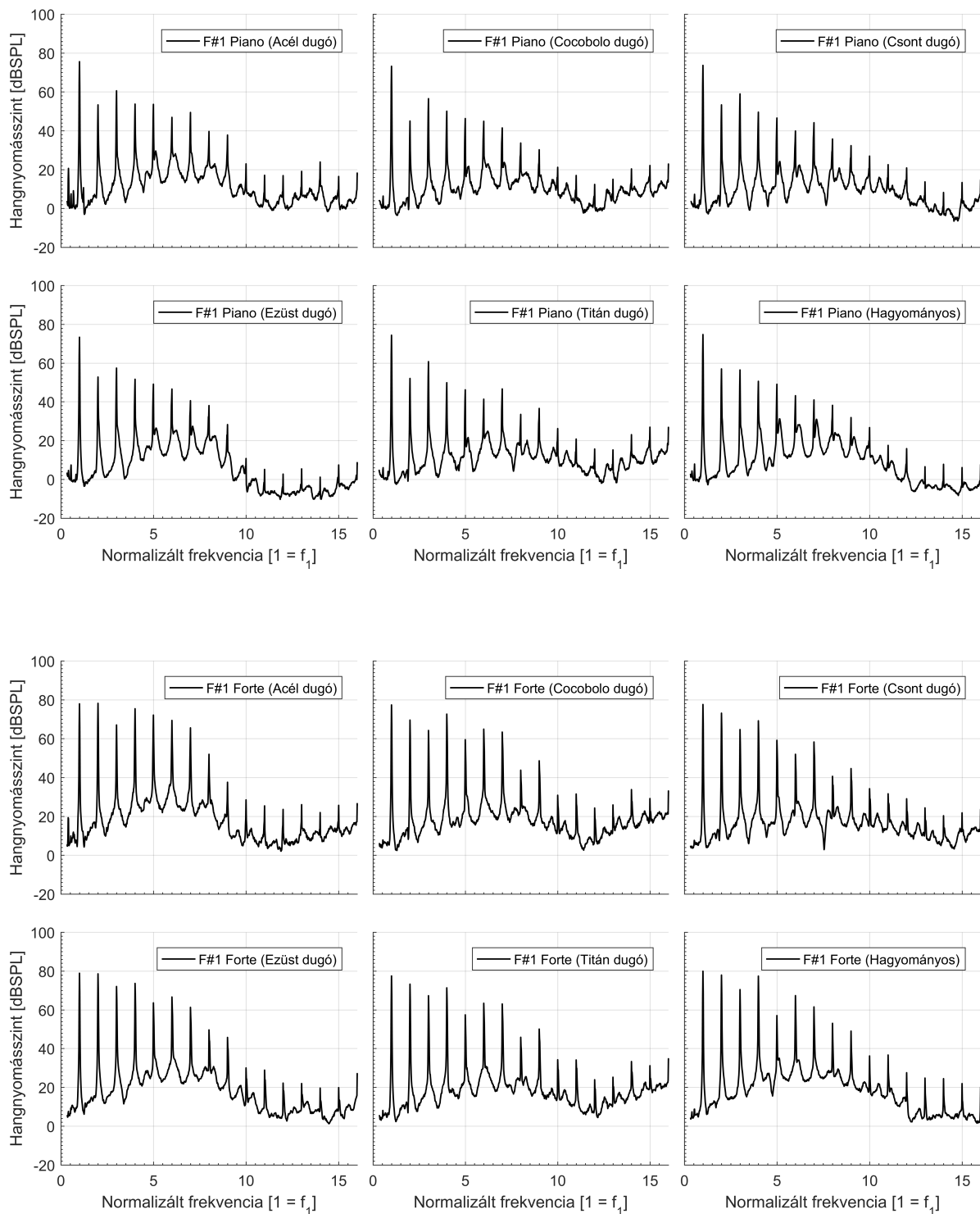
**10. ábra.** A D#1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)



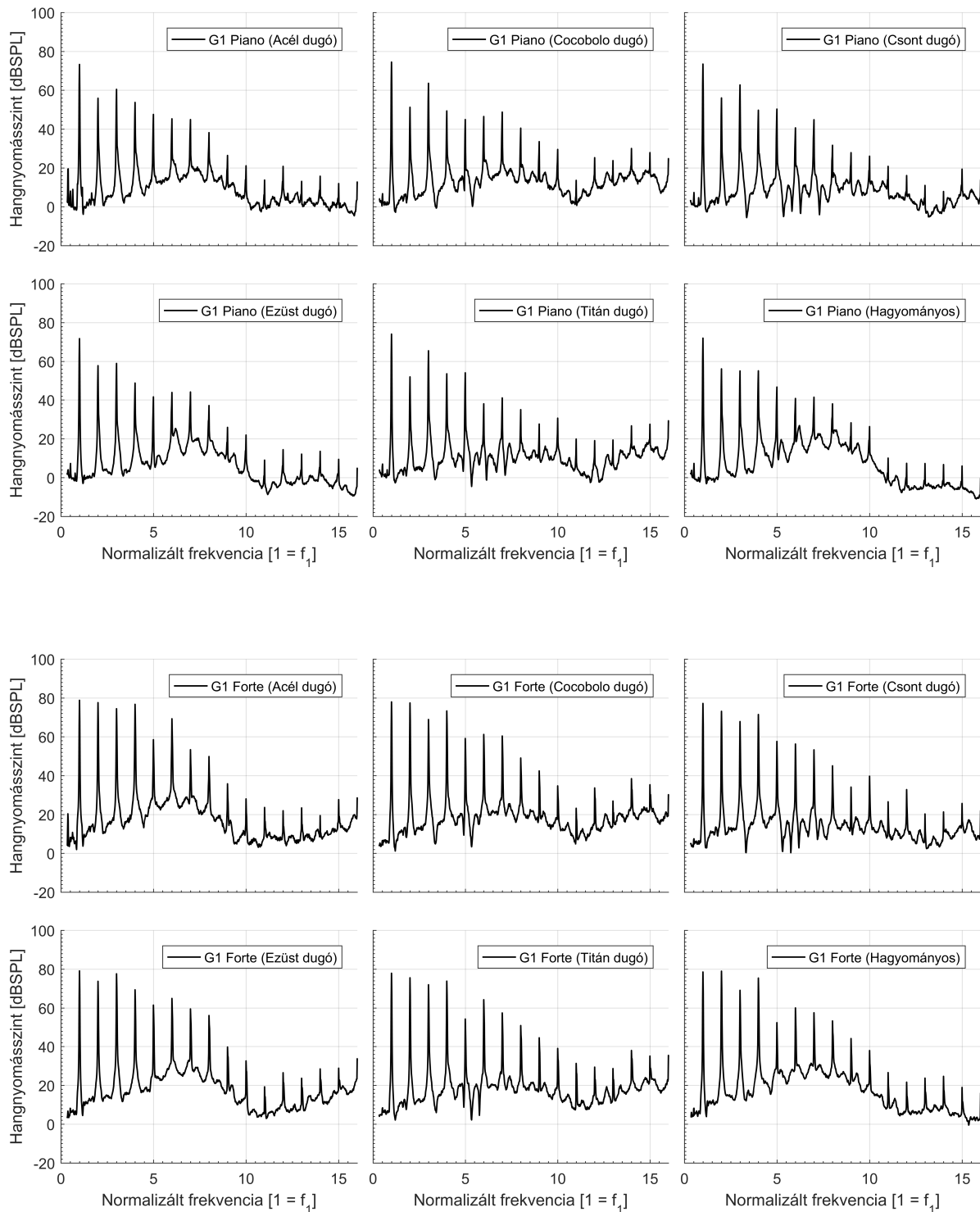
**11. ábra.** Az E1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangoló dugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)



**12. ábra.** Az F1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)



**13. ábra.** A F#1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)



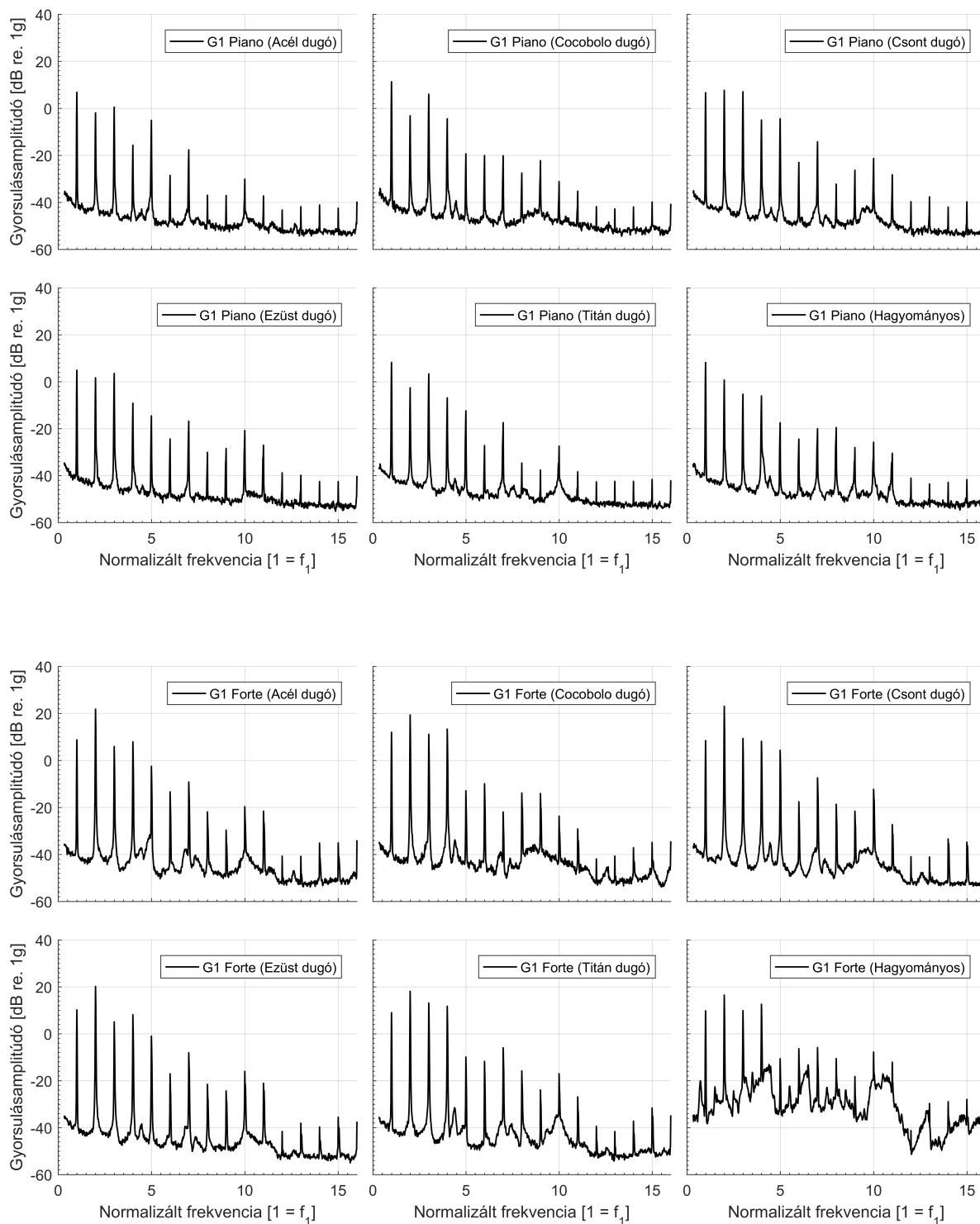
14. ábra. A G1 hang állandósult spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű és a nyitott végnél elhelyezett mikrofon által mért spektrumot ábrázolja.)



### 3.5. Rezgésszintek kiértékelése

Az állandósult állapotú hangnyomásspektrumokhoz hasonlóan az állandósult állapotú rezgés-gyorsulás-spektrumokat is kiértékeljük. A mért rezgés-gyorsulás-szinteket a 15. ábra mutatja a G1 hang esetében. Az alsó regiszterben a mért rezgésspektrumok a többi hang esetén is hasonlóak a G1 hangnál mért spektrumokhoz. A 14. ábrával összehasonlítva megfigyelhető, hogy a rezgés-gyorsulásjel spektruma jelentősen eltér a nyitott végnél lesugárzott hang spektrumától. *Piano* dinamika esetén a rezgés-gyorsulásjel első három harmonikusa között sokkal kisebb amplitúdó-különbségek figyelhetők meg, mint a lesugárzott hang spektrumában. *Forte* dinamika esetén az figyelhető meg, hogy a rezgésspektrumokban egyértelműen az oktáv lesz a legerősebb harmonikus, míg a lesugárzott hangban az alaphang és az oktáv amplitúdója között kis különbségek vannak.

A rezgésszinteket összehasonlítva a következő megállapításokat tehetjük. Az alsó regiszterben *piano* dinamikánál az átlagos rezgésszinteket tekintve a hagyományos és reformfejek közötti legnagyobb eltérés 3 dB, a középső regiszterben *forte* dinamikával pedig 6 dB.



15. ábra. A G1 játszott hang esetén a fuvola nyitott végéhez közel mérhető rezgés gyorsulásjel spektruma *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamika esetén a különböző hangoló dugókkal összeállított fuvolákon. (Minden diagram azonos léptékű.)

## 4. A hangok indításának vizsgálata

A hang indításának fontos szerepe van az észlelt hangminőség kialakulásában, ezért a hangok indítását érdemes objektív vizsgálatoknak is alávetni. A hangok indításának vizsgálatához a 1.4. szakaszban bemutatott szegmentálással kinyert berezgési (*attack*) szakaszokat elemeztük. Az elemzésben azt vizsgáljuk, hogy az egyes harmonikusok milyen felfutással jelennek meg az egyes hangok indításakor. Korábbi, más hangszereken végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a hangok indítását elsősorban a befúváshoz közeli mikrofonnal érdemes vizsgálni. Ezt az is indokolja, hogy a hang indítását a legnagyobb mértékben a megfúvás befolyásolja, ennek hatása pedig legjobban a befúváshoz közel mérhető.

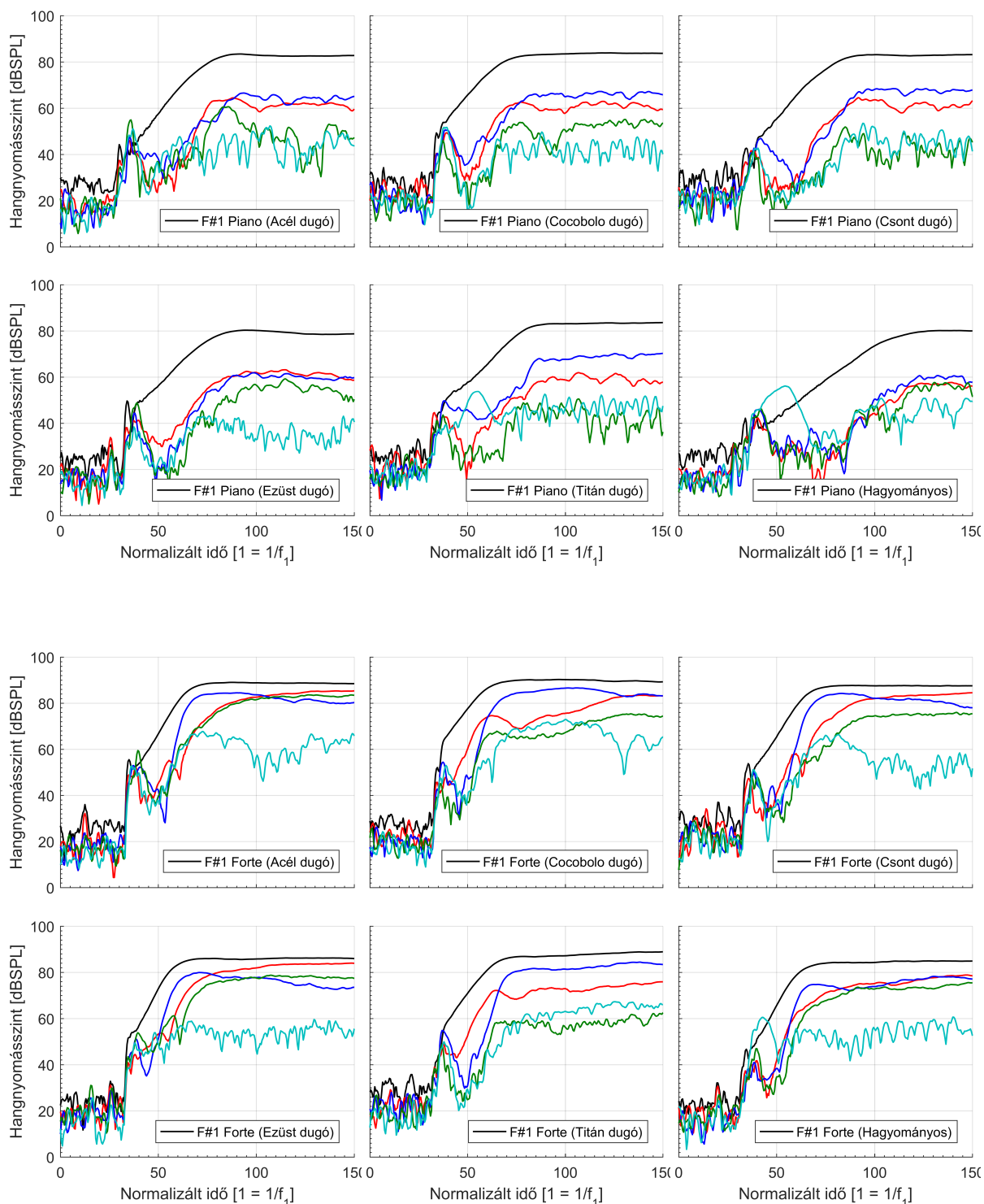
Ahhoz, hogy a spektrumban pontosan azonosítsuk a harmonikusokat, a berezgési szakaszokat minden esetben az utánuk következő állandósult szakaszokból számított  $f_1$  alaphérfrekvencia felhasználásával újramintavételeztük. Így kis pontszámú blokkokkal is pontosan meghatározható az egyes harmonikusok amplitúdóinak időbeli változása. A kis pontszámú blokkokra pedig a jó időbeli felbontás eléréséhez van szükségünk. A feldolgozáshoz a következő paramétereket választottuk: újramintavételezés frekvenciája  $f'_s = 64f_1$ , ablakméret  $N_{\text{win}} = 256$ , átlapolás az egymást követő ablakok között: 7/8; így a jel egy periódusában 2 ablakot kapunk, vagyis a megjeleníthető időfüggvények időfelbontása  $\Delta t = 1/(2f_1)$ .

Általánosan is igaz, hogy egy fúvós hangszer két egymást követő megszólalása is mutat kisebb különbségeket, még abban az esetben is, ha a megfúvást egy szabályozott gépi rendszer (pl. sípos orgonák esetén a szélrendszer) biztosítja. A fuvolahangok esetén ez természetes, mivel a játékos szólaltatja meg a hangszert. Emiatt azonban a hangok indításának objektív értékelése nehezebb feladatot jelent. Az elemzés során megfigyelhető volt, hogy a könnyebben megszólaltatható hangok (ezek elsősorban az alsó és a középső regiszter hangjai), illetve a nehezebben megszólaltatható hangok (a felső regiszter hangjai, elsősorban *piano* dinamikával) indításai különbözőek: a könnyebben megszólaltatható hangok egymást követő indításai sokkal jobban hasonlítanak egymásra, mint a nehezen megszólaltatható hangoké. Ez a jelenség figyelhető meg a fenti 3. ábrán is. A hangok indításának elemzésekor emiatt minden esetben a három egymást követő megszólalás közül azt az indítást ábrázoljuk az alábbi ábrákon, mely a leggyorsabb volt, mivel ezek mondhatók a „legsímább” indításoknak.<sup>4</sup>

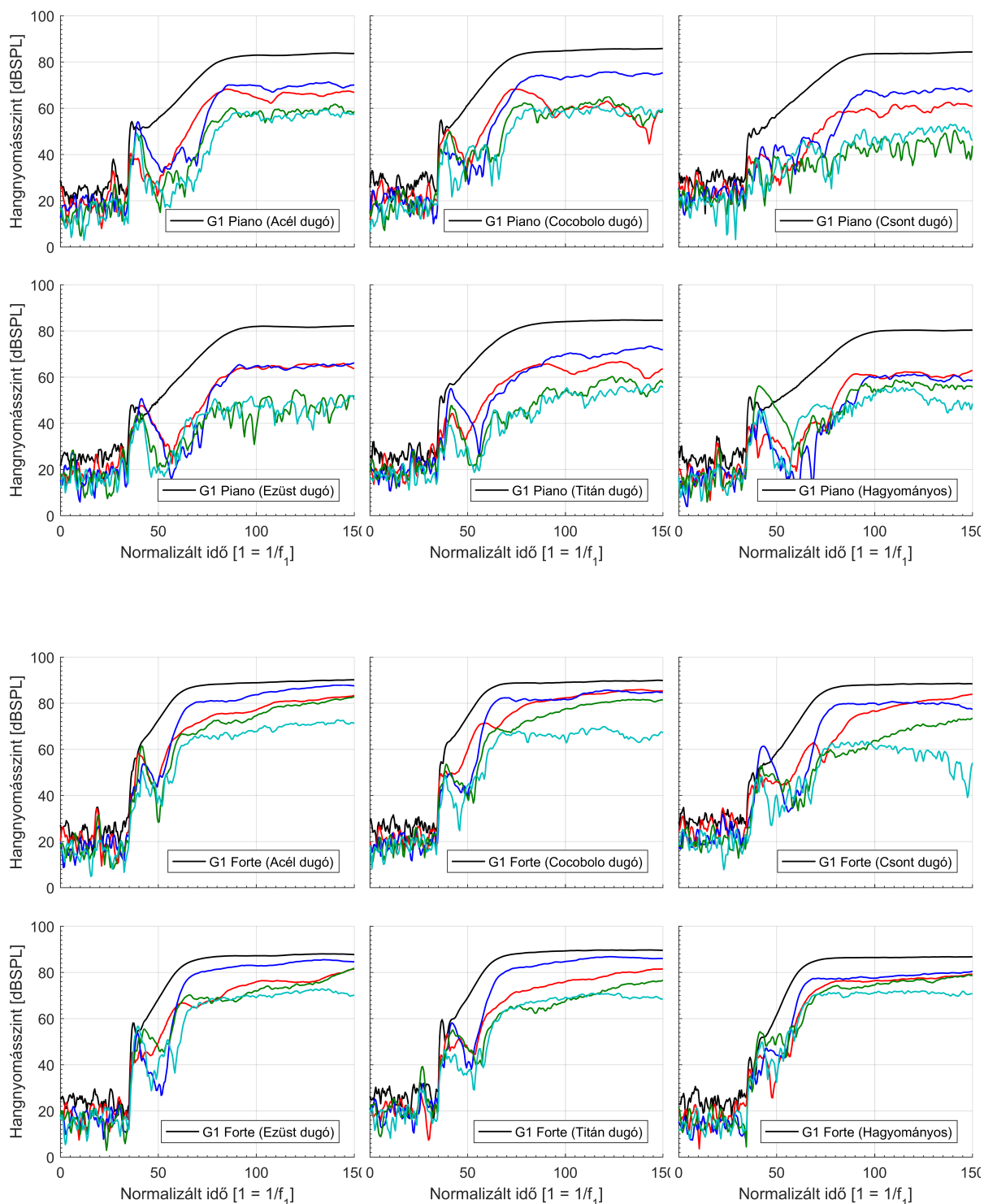
A 16–17. ábrák rendre a F#1 és a G1 hangok indítását mutatják. A diagramok a hang első öt harmonikusa amplitúdóinak időfüggvényét mutatják és skálájuk minden esetben azonos. A diagramok időegysége normalizált a könnyebb összehasonlítást segítő, az egység pedig az alaphang frekvenciájához tartozó periódusidő. Ezek a hangok jól tükrözik az alsó regiszterben megfigyelhető jelenségeket a többi hang esetén is. Általánosan igaz volt a vizsgált hangokra, hogy a *forte* dinamikával játszott hangok indítása gyorsabb a *piano* dinamikával megszólaltatott azonos hangmagasságú hangokénál. A reformfejek és a hagyományos fej között a F#1 hang esetében figyelhető meg a legnagyobb különbség. A hagyományos fejjel *piano* dinamika mellett jóval lassabb a hang megszólalása, mint a reformfejekkel. Szintén megfigyelhető, hogy a hagyományos fej esetén, mindkét dinamikánál a hang indításának elején relatíve erősen megjelenik az ötödik harmonikus (nagyterc). Ez sem a szomszédos F1 és G1 hangnál nincs így, sem a reformfejek esetében.

A hangok indításának gyorsasága mellett még az egyes felharmonikusok megjelenésének sorrendje is változhat a különböző fejek és hangolódugók esetében. Például a *forte* dinamikával játszott F#1 hangnál megfigyelhető, hogy az acél, csont és ezüst dugó esetében az alaphang mellett a harmadik felhang (tisztá kvint) alakul ki a leggyorsabban, míg a cocobolo és a titán dugónál az oktáv előbb jelenik meg, mint a kvint. A hagyományos hangolódugóval pedig az oktáv és a kvint nagyjából egyszerre épülnek fel.

<sup>4</sup>Azokat a megszólalásokat, ahol a hang indítása sikertelen volt, már a felvételek készítésekor töröltük és újra rögzítettük.



**16. ábra.** A F#1 hang indítása *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. A különböző színek az egyes harmonikusokat jelentik, minden diagramon azonosan: fekete – alaphang, piros – oktáv, kék – kvint, zöld – második oktáv, türkiz – nagyterc. (Minden diagram azonos léptékű és a befúváshoz közel elhelyezett mikrofon által mért szinteket ábrázolja.)



**17. ábra.** A G1 hang indítása *piano* (első és második sor) illetve *forte* (harmadik és negyedik sor) dinamikával játszva a különböző hangolódugókkal összeállított fuvolákon. A különböző színek az egyes harmonikusokat jelentik, minden diagramon azonosan: fekete – alaphang, piros – oktáv, kék – kvint, zöld – második oktáv, türkiz – nagyterc. (Minden diagram azonos léptékű és a befúváshoz közel elhelyezett mikrofon által mért szinteket ábrázolja.)



## 5. Az eredmények értékelése

A fenti eredmények alapján az alábbi következtetéseket lehet levonni.

1. A reformfejjel szerelt fuvolák állandósult hangjainál a spektrális súlypont a hagyományos fejjel szerelt fuvolához képest jellegzetesen feljebb tolódik, ahogy az a 6. ábrán is látható, illetve számszerűen a 2. táblázatból is kiolvasható. Vagyis, az új hangoló dugókkal és reformfejjel felharmonikusokban dúsabb fuvolahangok szólaltathatóak meg. Ezt az állítást alátámasztják a 7.–14. ábrákon feltüntetett spektrumok is.
2. A 7.–14. ábrákon látható, hogy az új hangoló dugókkal ellátott reformfejjel megszólaltatott hangok spektruma jelentős különbségeket mutat a hagyományos fejjel összeállított fuvolán játszott tartott hangok spektrumaihoz képest. Különösen az alsó regiszterben figyelhető meg, hogy a spektrum burkolója (a harmonikusok csúcsainak magassága) jelentősen eltér a hagyományos spektrum burkolójától. Például az E1 hang esetében a hagyományos fejjel az alaphang a legerősebb komponens, míg a különböző új hangoló dugókkal az oktáv és a második oktáv az alaphanggal egyező vagy erősebb amplitúdóval szólal meg. A burkoló előbbihez hasonló változása figyelhető meg a skála egyéb, a jelentésben részletesen nem bemutatott hangjainál is. Ezek a különbségek feltehetően szubjektív összehasonlításban is észlelhetőek.
3. A hangszertestre rögzített rezgés gyorsulás-érzékelőkkel felvett spektrumokban is jelentős különbségek láthatóak az egyes hangoló dugókkal összeállított fuvolák között. Egyelőre nyitott kérdés, hogy a rezgésspektrumokban megfigyelhető különbségek hogyan befolyásolják a hangminőségérzetet, mivel a jelentésben bemutatott vizsgálatoknak ennek megállapítása nem volt célja.
4. A hangok indítását tekintve is különbözőek az egyes hangoló dugókkal összeállított fuvolák. Különbségek figyelhetőek meg a reform fuvolafej javára a fent részletezett módon a hangok indításának gyorsaságában. Emellett a reform- és a hagyományos fejet összehasonlítva az egyes hangok indításában a harmonikusok megjelenési sorrendje és erőssége is eltérő lehet.

Elmondható, hogy a fent bemutatott mérési és kiértékelési módszer alkalmas a fuvolahangok objektív jellemzőinek mérésére. Továbbá elmondható, hogy a fenti módszerekkel a különböző fuvolafejekkel rögzített hangok között számszerűsíthető különbségek mutathatóak ki.

Kelt: Budapest, 2017. április 28.

.....  
Rucz Péter