

Termoakusztikus projektfeladat Rijke-cső vizsgálatára

Beke Tamás PhD. hallgató, SZTE-TTIK Fizika Doktori Iskola
Munkahely: Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium
e-mail: bektomi@freemail.hu

A cikkben Rijke-csővel végzett projektjellegű fizikai mérési és vizsgálati feladatot mutatok be. Projektünk célja az volt, hogy a tanulók termoakusztikai ismereteinek bővítése mellett fejlődjenek az alkalmazott informatikai, valamint a team-munka jellegű képességeik és készségeik is.

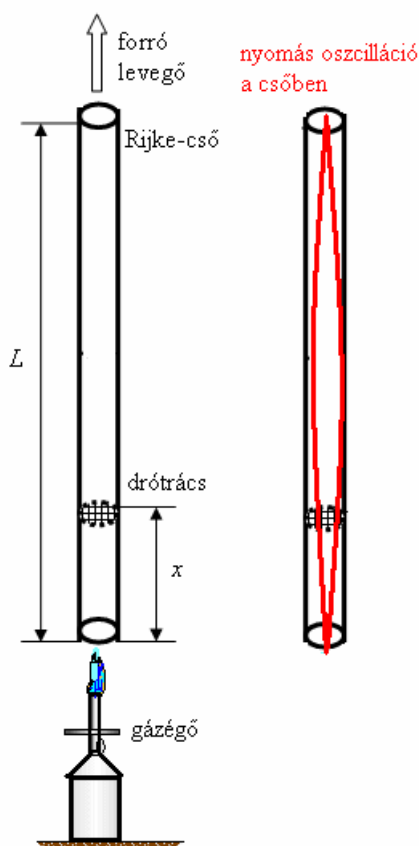
A Rijke-cső

A Rijke-cső egy mindkét végén nyitott cső, melynek belsejébe egy hőforrást helyeznek el. A hő forrása lehet gázláng vagy elektromos fűtés. Ha a cső függőleges helyzetben van és a hőforrás alul található, a cső erős hangot bocsáthat ki a hőforrás helyzetétől függően. A jelenséget *Petrus Leonardus Rijke* fedezte fel 1859-ben, ezért Rijke hanghatásnak nevezik ezt a termoakusztikus jelenséget, mely során a hő hatására hanghullám alakul ki az eszközben.

A Rijke-cső a XIX. században csak egy érdekes eszköznek számított; a XX. században a sugárhajtású repülőgépek és a rakéták megjelenésével változott a helyzet: az égés ezeknek a hajtóművében nagyon nagy teljesítménysűrűségű. Ennek az energiának kis hányada is elegendő ahhoz, hogy a hajtómű belsejében hanghatást keltsen és tartson fenn, ami szintén termoakusztikus jelenség; ez akusztikus hullám nagyon erőteljes és akár a hajtómű károsodásához is vezethet. A Rijke-cső azért került néhány évtizeddel ezelőtt újra a figyelem középpontjába, mert bizonyos értelemben jó és egyszerű modellje a sugárhajtású motoroknak és a rakéták hajtóműveinek [3].

A Rijke hanghatás

A mindkét végén nyitott csőben akusztikus állóhullámok alakulhatnak ki: a gáz a cső minden részén váltakozva összenyomódik és kitágul, a gázrészecskék a csőben rezgőmozgást végeznek. Álló hanghullámok könnyen kelthetők a csőben valamilyen energiaforrás segítségével, pl. a cső egyik végénél (1. ábra).



1. ábra: Gázégővel melegített Rijke-cső vázlata

Ha az energiaforrást kikapcsoljuk, a keltett hanghullám amplitúdója csökken, mivel sűrűlódás lép fel a cső falával és az energia elveszik a cső nyitott végénél. Ezek szerint az energiaforrásnak nem csak az a szerepe, hogy újabb hanghullámokat kelt, hanem a már meglévő hanghullámokat is fenntartja [1,3].

A Rijke-cső megépítése

A mérésekhez a következő eszközökre van szükség:

- Rijke csövek állványzattal (1 db alumínium és 1 db réz csövet, illetve egy üvegből készült csövet is használtunk, mert azon könnyű volt szemléltetni a drótakezdály helyzetét)
- Gázégő (szabályozható teljesítményű).
- Drótháló (rács), melyet a cső belsejébe helyezünk; ezt melegítjük a gázláng segítségével.
- Hang rögzítésére és mérésére szolgáló eszköz. (pl. egy mikrofon és számítógép hangkártyával).
- Hőmérő, amely több száz °C hőmérsékleten is használható: a mérésekhez IR-380 típusú infravörös digitális hőmérőt használtunk.
- A levegő áramoltatásához egy berendezés (pl. hajszárító, vagy porszívó).
- Hangintenzitás mérő műszer (A kvantitatív eredményekhez van szükség a műszerre, egyébként e nélkül is elvégezhetők a kísérletek.) A mérésekhez Voltcraft 322 Datalog típusú digitális zajszintmérőt használtunk; a műszert az SZTE-TTIK Kísérleti Fizikai Tanszékéről kaptuk kölcsön, amiért köszönetet mondunk.

Ezen eszközök egy része (állvány, cső, gázégő, drótrács) minden iskolai fizikaszertárban megtalálható, más részük (mikrofon, számítógép hangkártyával illetve porszívó) szintén megtalálható az oktatási intézményekben; ezek tehát nem kerülnek külön pénzbe. Szerencsére nem feltétlenül szükséges a felsorolt eszközök mindegyike, tulajdonképpen a mikrofon és a számítógép elegendő ahhoz, hogy relatív hangosságokat megállapítsunk. A mérések elvégzése nem igényel külön ráfordítást az iskolától, ez összhangban van a Rocard-jelentéssel [4].

A mérések során a következő összefüggésekre kerestünk választ:

- A cső hossza és a hőforrás helyzete hogyan befolyásolja a hang keletkezését?
- A hőteljesítmény változtatása miképpen befolyásolja a kibocsátott hang hosszát illetve intenzitását?
- A rács hőmérsékletétől hogyan függ a cső által kibocsátott hang hossza és intenzitása?
- Ha a csőben külön légáramoltatás is van, akkor ez befolyásolja-e a hangkibocsátást?

Az iskolai projekt

Az iskolai projektek középpontjában általában valamilyen gyakorlati jellegű feladat –egy megoldandó probléma áll. A megfelelően előkészített és kivitelezett projektfeladat megoldása közben a gyermekeknek pont azok a tulajdonságai, képességei, készségei, kompetenciái fejlődnek, amelyre az egész életükben szükségük van (tervezés, szervezés, kommunikáció, információ-feldolgozás, együttműködés, feladatok megosztása, stb.).

Az iskolai projektünkben önkéntes alapon vehettek részt a Nagyasszonyunk Katolikus Általános Iskola és Gimnázium tanulói. A méréseket délutánonként végeztük fizika szakkör-foglalkozásokon, 3-6 tanuló dolgozott minden csoportban (2.ábra).



2.ábra: (a) Rijke-cső a mérőműszerekkel együtt; (b) a tanulók méréseket végeznek a projektfeladat során

A mérések során 3 különböző Rijke-csővel dolgoztunk, egy-egy tanulói csoport vizsgálta az egyes csövek viselkedését, az eszközök egy részét közösen használtuk (pl. zajszintmérő, digitális hőmérő). Ez külön szervezést igényelt. Ezen kívül arra is ügyelnünk kellett, hogy az egyik team Rijke-csővének hangja ne zavarja meg a másik csoport mérését. Ezért a munkánkat össze kellett hangolni, hiszen korlátos erőforrásokon osztozkodtunk, illetve egymás zavarása nélkül kellett dolgoznunk. Ezzel – mintegy mellékesen – a tanulók szervezőképességét is fejlesztettük, sőt a szociális kompetenciák (osztozkodás a közös eszközökön) is fejlődtek. (Amíg projekt elején előfordult, hogy nem tudtak megegyezni, hogy ki mit használjon; ez a későbbiek folyamán gördülékenyen ment.) Minden mérést ötször megismételtünk és az átlagértékekkel számoltunk tovább; a kapott eredményeket számítógépen rögzítettük.

A mérés menete

Első lépésként a gázégők teljesítményét határoztuk meg: a teljesítmény mérését visszavezettük a hőmérsékletváltozás és az idő mérésére; meghatározott mennyiségű (ismert tömegű) és kezdőhőmérsékletű vizet melegítettünk a forráspont eléréséig; így a hőmérsékletváltozást könnyen kiszámolhattuk. A víz fajhőjének ismeretében kiszámítható a belső energia változása, de a hatásfokot nem ismertük; hiszen melegedett a tárolóedény, a tartóállvány, a környező levegő is. Ezt úgy küszöböltük ki, hogy különbségi méréseket végeztünk.

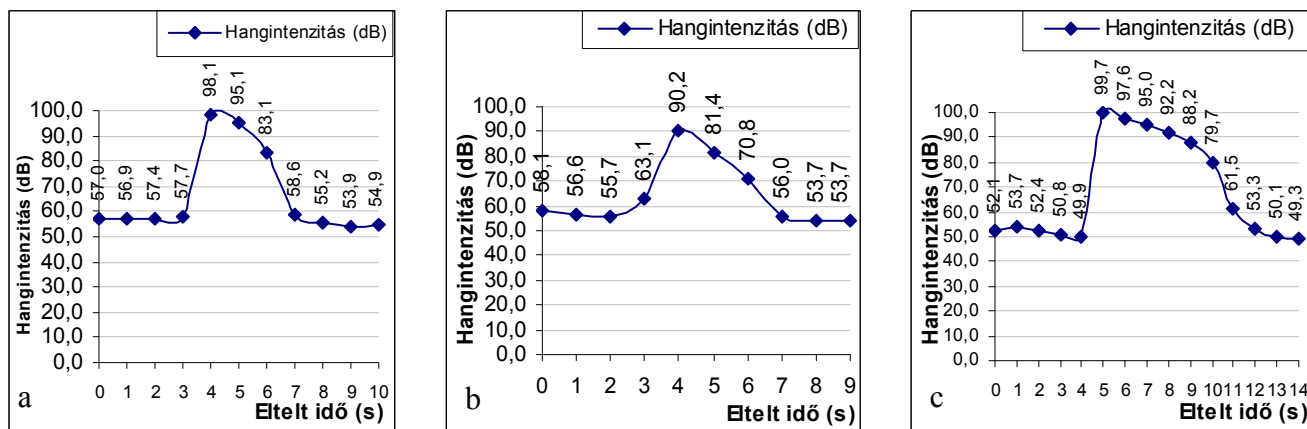
Második lépésként a Rijke-csőbe helyezett rácsok áteresztőképességét határoztuk meg. Első ötletünk az volt, hogy a csőhöz egy porszívót kötünk, majd mérjük az adott idő alatt átáramlott levegő mennyiségét úgy, hogy a csőben benne van a rács, illetve úgy, hogy nincs rács a csőben. A kettő mérés aránya megadja a rács áteresztőképességét. Sajnos ez a módszer a gyakorlatban nem működött, ugyanis nem volt mérhető különbség a két eset között; ezért más módszert választottunk. A rácsokról digitális fényképet készítettünk szupermakro módban, majd megmértük egy üres négyzetrács méretét, megszámláltuk a cső belsejébe eső ilyen négyzetrácsok számát (a szélén lévő torzult négyzeteket félnek vettük), majd összesítettük a területeiket. Az összes üres terület és a cső belső keresztmetszetének hányadosa megadja a rács áteresztőképességét. Az általunk használt 3 különböző rácsnak az áteresztőképessége rendre 68%-nak, 78%-nak, illetve 85%-nak adódott. Mindhárom ráccsal végeztünk méréseket. Jelentősebb eltéréseket nem találtunk az egyes esetekben. Sokkal inkább a rács anyaga számít; bár mindhárom rács acélból készült, a legsűrűbb rács bizonyult a legmegfelelőbbnek; mindenképpen célszerű valamilyen magas olvadáspontú rugalmas fémrácsot beszerezni.

A hőmérséklet mérése IR-380 típusú érintésmentes mérőműszerrel történt, mely a hőmérsékletet az objektum által az infravörös tartományban kisugárzott energia alapján határozza meg, az emisszió-fok figyelembe vételével.

Hangkibocsátás a gázegő teljesítményének függvényében

Ha a függőleges helyzetű csőben lévő rácsot elkezdjük gázlánggal melegíteni, akkor rövid időn belül felforrósodik a rács. Ha ezután is folytatjuk a melegítést (azonos teljesítménnyel), akkor a rács hőmérséklete már nem nagyon emelkedik, legalábbis a mérési pontosságon belül ezt tapasztaltuk. Ha közben vizsgáljuk a Rijke-cső által kibocsátott hangot, akkor azt figyeltük meg, hogy a hangkibocsátás időtartamának jól érzékelhető maximuma van, méghozzá közelítőleg akkor lesz a leghosszabb a kibocsátott hang, amikor a rács a melegítés során eléri a hőmérsékleti plató kezdetét. További melegítésre rövidül a kibocsátott hang. Van tehát egy optimális időtartam, amíg célszerű melegíteni a rácsot. Ha a kísérlet közben a csővég hőmérsékletét is mérjük, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy az fokozatosan növekszik, a cső anyagától, geometriai méretétől (közvetve a tömegétől), a melegítés intenzitásától, illetve a rácshelyzettől függően. Ezek után ábrázoltuk az idő függvényében a rács és a csővég hőmérsékletének különbségét, és azt kaptuk, hogy ennek a függvénynek is maximuma van, méghozzá nagyjából azon a helyen, ahol a kibocsátott hang hosszának is. Azt mondhatjuk tehát, hogy a hangkibocsátás időtartama függ a rács és a csővég hőmérsékletének különbségétől.

Különböző égőteltjesítmények esetén is vizsgáltuk a cső hangkibocsátását. Ebben az esetben a rács helyzete és áteresztőképessége nem változott. Minden fűtőteltjesítmény és minden rácshelyzet esetén mértünk meghatározott időtartamú melegítés után. A keletkezett hang intenzitásának és hosszának időfüggésében is hasonlókat tapasztaltunk ahhoz, amit az előzőekben leírtam; azaz van egy optimális melegítési idő, ami után már nem nő tovább a kibocsátott hang időtartama és az intenzitása sem nő tovább. A rács helyzetét (x) tekintve a cső alsó végétől indultunk és minden méréssorozat után fokozatosan egyre feljebb helyeztük el a rácsot. A kibocsátott hang hossza és intenzitása is fokozatosan nőtt, amíg el nem értünk a csőhossz (L) negyedrésznének közelébe. Az $x=L/4$ hely körül található mind a hangintenzitásnak, mind a hang időtartamának maximuma (3.ábra).



3.ábra: $x = L/4$ rácshelyzetnél a hang intenzitása az időtartam függvényében: (a) üvegcső, égőteltjesítmény kb. 300 W; (b) rézcső, égőteltjesítmény kb. 340 W; (c) alumínium cső, égőteltjesítmény kb. 430 W.

A cső negyedrészt elhagyva fokozatosan csökkentek mind a kibocsátott hang időtartamának, mind intenzitásának értékei. Érdekes, hogy nem szimmetrikus a cső első és második negyedrésznének viselkedése. A második negyedben gyorsabban csökkentek a mért értékek, mint amennyire az első negyedben emelkedtek. A cső felének közelében eljutunk egy olyan ponthoz, ahol már nem bocsát ki hangot a cső. Hiába változtattuk a melegítés idejét, illetve teljesítményét, nem keletkezett hang a Rijke-csőben, ekkor a gáznyomás és a hőátadás ellentétes fázisban vannak egymáshoz képest [3].

Ha a hangkibocsátást a gázégő teljesítményének függvényében jellemezzük, akkor küszöbszerű viselkedést tapasztaltunk. Túlzottan kis teljesítmény esetén egyik cső sem szólalt meg. Próbálkoztunk gyertyalánggal, illetve borszesz-égő lángjával megszólaltatni a csöveket, de ez nem sikerült; valószínűleg azért, mert nem tudták kellőképpen felmelegíteni a rácsot. Ha növeltük a gázégő teljesítményét, akkor már megszólaltak a csövek.

Az alumíniumcső kb. 150 W teljesítmény felett bocsátott ki hangot. A teljesítményt és a melegítés idejét külön-külön fokozatosan növelve eljutunk egy optimális ponthoz, ahol a leghosszabb ideig hallható a csőben keletkező hang. Ez a csőtől és a rácshelyzettől függően 300-500 W közötti teljesítményt jelent. Ha még tovább növelem a teljesítményt, akkor egy idő után nemcsak csökken a hang hossza, hanem teljesen megszűnik a hangkibocsátás. Ennek az oka két dolog is lehet: egyfelől a nagy gázégő-teljesítmény maga után vonja a csőben áramló levegő sebességének növekedését, ami akadályozza a hanghullámok kialakulását; másrészt a túl nagy teljesítményű láng egyszerűen szétolvaszthatja a rácsot, ezáltal megszűnik a hangot keltő „energiapumpa”.

Vízszintes helyzetű cső

Ha a csövet vízszintes helyzetbe fordítjuk és így melegítjük a rácsot, akkor alapesetben (külön légáramoltatás nélkül) nem keletkezik hang, hiszen nincs a levegőnek természetes konvekciós áramlása, (kéményhatás), ezért nyomásfluktuáció sem alakul ki. Ekkor semmilyen rácshelyzet és semekkora égőteli teljesítmény esetén sem bocsát ki hangot a cső. Más a helyzet, ha külön légáramlást biztosítok a csőben, pl. egy porszívó segítségével. Ekkor már keletkezik hang, még hozzá nagyjából hasonlóan ahhoz, ahogy a cső függőleges helyzetben viselkedik.

A porszívó szívási teljesítményét úgy számítottuk ki, hogy felfújtunk egy nagyobb (kb. 50 literes) műanyag zacskót, majd rövid ideig kiszívtuk belőle a levegő egy részét. A szívási teljesítményt ($\Delta m/\Delta t$) a gáztörvényből kaptuk:

$$\Delta m = \frac{p \cdot M \cdot \Delta V}{R \cdot T},$$

ahol T a gáz abszolút hőmérsékletét, p a levegő nyomását, M a moláris tömegét, ΔV a levegő térfogatának megváltozását jelenti, R pedig az univerzális gázállandó. Feltételeztük, hogy a nyomás közel állandó, mivel csak kevés levegőt szívtunk ki; azaz elég volt a zacskó térfogatnak megváltozását mérni. (A nyomást 10^5 Pa-nak, a hőmérsékletet 293 K-nek vettük.) Ebből a porszívó szívási teljesítményére 0,9 g/s adódott.

Az $x=L/4$ helyzet közelében van a rács optimális helyzete és az $x>L/2$ rácshelyzet esetén nem tapasztaltunk hangot. Sajnos a porszívó szívási teljesítményét nem tudtuk megfelelően szabályozni, ezért azt nem tudjuk megmondani, hogy mekkora minimális légáram-intenzitás esetén szólal meg a Rijke-cső, illetve mekkora az a maximális légáram-intenzitás aminél még keletkezik hang a csőben. Az biztos, hogy itt is van küszöbhatás. Ezt úgy tudtuk demonstrálni, hogy állandó értékű égőteli teljesítmény esetén a porszívó csövét távolabb vittük a Rijke-cső szájától, majd fokozatosan közelítettünk a porszívóval a Rijke-cső felé a kísérletek során, így a Rijke-csőben átáramló levegő mennyisége is fokozatosan növekedett. A cső kezdetben nem bocsátott ki hangot, de egy idő után már elegendő volt a légáram, és megszólalt a Rijke-cső.

Termoakusztikus oszcilláció

A termoakusztika szerint a hanghullám a hőterjedés során alakul ki a „szonikusan indukált hőgradiens” következtében. A gázmolekulák a cső hidegebb vége felé gyorsulnak, ezáltal a tubus fűtött végénél a relatív gáznyomás lecsökken, újabb gázrészecskék gyorsulnak a fűtött csővég felé, ahol feltöltik az alacsonyabb nyomású térfogatrészt. Itt a gáz újra felmelegszik, majd az egész folyamat kezdődik előlről. A gázmolekulák felgyorsulása és lelassulása az időben szinuszosan történik, végeredményül egy önfenntartó szinuszos longitudinális gáznyomás-oszcilláció jön létre. A Rijke-csőben keletkező állóhullámok esetén a kitérésnek duzzadóhelye van a cső mindkét végénél, azaz a cső hossza a hullámhossz felének egész számú többszöröse [2]:

$$L = \frac{\lambda}{2} \cdot n, \text{ és } n=1, 2, 3, \dots$$

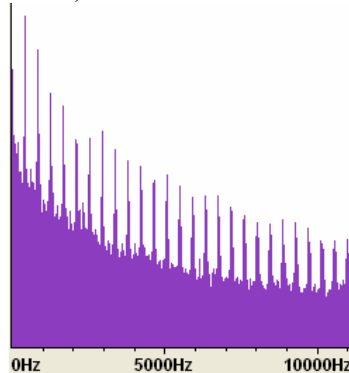
A kialakuló hangrezgés frekvenciája (f):

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot L} \cdot n,$$

ahol n a harmonikusok száma ($n=1$ -et nevezzük alapharmonikusnak), c a közegbeli hangsebesség.

Láthatjuk, hogy a frekvencia függ a harmonikusok számától, a közegbeli hangsebességtől és a cső hosszától. A tubus hosszának csökkenésével az alapharmonikus és a felharmonikusok hullámhosszai is csökkennek (állandó gázbeli hangsebesség esetén).

Valójában a hangsebesség nem állandó, mivel a hőmérséklet és a nyomás is folytonosan változik. A cső által kibocsátott hang frekvencia-spektrumát Audacity 1.3 Beta (freeware=szabadon letölthető) programmal vizsgáltuk (4.ábra).



4.ábra: A rézcső által kibocsátott hang frekvencia spektruma

Az üvegcsőnek a legerőteljesebben megszólaló frekvenciája 512 Hz, amely nem esik messze az „elméleti alapharmonikus” (460 Hz) frekvenciájától. A rézcső esetén az alapharmonikus mért értéke 453 Hz, számított érték 329 Hz; az alumínium cső esetén a mért frekvencia 232 Hz, a számított érték 228 Hz. Látható, hogy az alumínium csőnél nagyon jól közelít egymáshoz a mért és a számított alapfrekvencia érték. A két kisebbik cső esetén az eltérést valószínűleg az okozta, hogy ezek a csövek hamarabb felforrósodtak, ezért a hangsebesség jelentősen megváltozott.

Összegzés

A cikkben Rijke csővel végzett termoakusztikus projektfeladat eredményeit mutattam be. A csővel végzett kísérleteket csoportmunkában, projektszerűen oldottuk meg. Alapvetően olcsó, minden iskolában megtalálható eszközöket használtunk; amelyek nem voltak meg a mi iskolánkban, azokat pedig kölcsönkértük, így ez nem okozott extra kiadásokat számunkra.

A tanulóknak nem csak a termoakusztikai ismereteik bővültek, hanem a természettudományos gondolkodásuk, problémalátó és problémamegoldó képességeik is fejlődtek. A természettudományos kompetenciák mellett a szociális jellegű (team-foglalkozás, feladatelosztás, eszközök megosztása, stb.) készségeik is fejlődtek, amit mindenképpen hasznosnak ítélek a jövő szempontjából. A gázzal melegített Rijke-cső vizsgálatát tulajdonképpen a projektünk első lépcsőfokának tekinthetjük. A következő lépésben szeretnénk pontosabb adatokat kapni úgy, hogy építünk egy elektromosan fűtött Rijke-csövet.

A projektszemléletű oktatás új lehetőséget teremt az ismeretátadásban, a kísérletezésen alapuló tanulásban, valamint a csoportos tanulás módszereinek kialakításában. A kollégák számára bátran ajánlom, hogy próbálják ki ezeket, vagy hasonló termoakusztikai kísérleteket.

Köszönetnyilvánítás

A cikk a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Karán Fizika PhD. program (A közép- és a felsőfokú fizika oktatásának fejlesztésére irányuló kutatások) keretében készült. Külön köszönetem szeretném kifejezni a témavezetőnek, Dr. Papp Katalin tanárnőnek, aki

hasznos információkkal és adatokkal segített a cikk megírásában, illetve a hiányzó mérőműszerek beszerzésében.

Irodalom

- [1] Entezam B, Van Moorhem W K, Majdalani J: Two-dimensional Numerical Verification of the unsteady thermoacoustic field inside a Rijke-type pulse combustor, *Numerical Heat Transfer, Part A* 41, 245-262 o., 2002.
- [2] Fahey D: Thermoacoustic Oscillations, *Wave Motion and Optics*, Spring, 2006.
- [3] Sarpotdar S M, Ananthkrishnan N, Sharma S D: The Rijke Tube –A Thermo-acoustic Device, *Resonance*, 2003 January, 59-71o., 2003.
- [4] Rocard jelentés:
Science Education NOW: A renewed Pedagogy for the Future of Europe
Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007.