

**A fizika tantárgyhoz kapcsolódó természettudományos  
iskolai projektfeladatok kidolgozása és vizsgálata**

**Ph.D. értekezés**

**Beke Tamás**

**Témavezető: Dr. Bene Gyula egyetemi docens,  
a fizikai tudomány kandidátusa**

**ELTE TTK Fizika Doktori Iskola**

**Vezető: Dr. Tél Tamás egyetemi tanár**

**Fizika Tanítása Doktori Program**

**Vezető: Dr. Tél Tamás egyetemi tanár**



**Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Természettudományi Kar**

**2016**

# Tartalomjegyzék

Bevezetés .....	3
1. A természettudományos tantárgyak oktatása.....	5
1.1. A természettudományok oktatási helyzete.....	5
1.2. A motiváció szerepe .....	8
1.3. A fizika és az informatika tantárgy helyzete.....	9
1.4. Mit tehetnek a pedagógusok?.....	15
2. A projektoktatás .....	16
3. SZAVFIT projektek .....	19
4. Közlekedéshez kapcsolódó projektfeladat.....	23
5. Energetikai projektfeladat.....	36
5.1. A nap- és a szélenergia lakossági felhasználásának modellezése .....	39
5.1.1. A házikó projekt .....	40
5.1.2. A számítógépes program.....	44
5.1.3. Szimuláció .....	55
5.2. Az óraátállítás hatásainak vizsgálata .....	61
6. Színes kaméleonok fázisátalakulása.....	68
6.1. Kaméleonos feladat .....	69
6.2 Szimulációs eredmények .....	73
7. Termoakusztikai projektfeladat.....	79
7.1. Gázzal fűtött Rijke-csövek vizsgálata .....	79
7.1.1 Az iskolai projekt.....	80
7.1.2. A mérés menete .....	82
7.1.3. Küszöbhatás.....	85
7.2. Termoakusztikus oszcilláció .....	88
7.2.1. Állóhullámok a csőben.....	89
7.2.2. Rayleigh-feltétel .....	95
7.2.3. A küszöbhatás magyarázata .....	97
7.3. Elektromosan fűtött Rijke-cső vizsgálata .....	100
8. A projektmunka hatásainak vizsgálata .....	112
8.1. SZAVFIT projektek eredményei és hatásai .....	112
8.2. Az iskolai projektfeladatok kérdőíves vizsgálata.....	114
Függelék .....	121
Köszönetnyilvánítás .....	128
Felhasznált irodalom és hivatkozások.....	128
Saját publikációk.....	134
Összegzés.....	135
Summary.....	137

## Bevezetés

A XX. századot és a XXI. század elejét tekintve a természettudományok területén nagyon jelentős felfedezések és változások történtek; elég, ha az atomenergia katonai, illetve békés célú felhasználására gondolunk. A természettudományos diszciplínákon belül a fizikában és az informatikában óriási léptékű fejlődés következett be, ami jelenleg is tart: pl. az elektronika, majd a mikroelektronika megjelenése és rohamos léptékű terjedése a technikai élet minden szegmensében; a számítógépek tömeges elterjedése; információs-kommunikációs hálózatok kialakulása. A XXI. század embere magától értetődőnek veszi az őt körülvevő technikai környezet (pl. mobiltelefon, digitális fényképezőgép, GPS navigáció) használatát, igazából csak az tűnik fel neki, ha valamelyik eszköz nem működik megfelelően.

Azt gondolhatnánk, hogy a természettudományok megbecsültségnek örvendenek a lakosság körében, hiszen szinte mindenki élvezi, vagy legalább hasznosítja a vívmányait. Sajnos a helyzet koránt sincs így. Sokan egyszerűen nem gondolják végig, hogy mit is köszönhetnek a természettudományos diszciplínáknak, ezért nem is tartják fontosnak e tudományterületeket. Az emberek egy része nem veszi tudomásul, hogy pl. a fizikai és kémiai ismeretek nélkül a mai értelemben vett modern, civilizált élet nem is létezhetne.

Ez az ambivalens helyzet megmutatkozik a természettudományos tantárgyak iskolai oktatásában is. Ha megvizsgáljuk a tanulók átlageredményeit, akkor nagy valószínűséggel a fizika és a kémia lesz a két sereghajtó a legtöbb iskola legtöbb osztályában. Természetesen vannak üdítő kivételek, de sajnos hosszú évek, sőt évtizedek óta ez a szomorú helyzet. Ha csak arról lenne szó, hogy ez a két legnehezebb tantárgy, ezért ezekből kicsit rosszabbak az átlageredmények, az még nem lenne probléma, de általában óriási szakadék tátong e két tantárgy és a többi eredményei között. Egy átlagos osztály – akár az általános, akár a középiskolában – úgy fest, hogy van néhány érdeklődő tanuló, aki valamilyen okból tanulja és tudja ezeket a tantárgyakat, van egy középső réteg, akik legalább néha motiválhatók, és sajnos van egy olyan réteg, akiket szinte alig lehet bevonni az adott szaktárgyak tanítási-tanulási folyamatába.

Az okokat nagyon nehéz röviden megmagyarázni. Az utóbbi két és fél évtizedben jelentősen megváltozott a társadalom, megváltozott az oktatáspolitikai, megváltozott az egész oktatás, de valahogy az oktatási módszerek nem idomultak eléggé a változásokhoz. A pedagógusok többsége alapvetően ma is úgy tanít, mint ahogyan azt 100 esztendővel ezelőtt elődeink tették. Szerencsésebb esetben használ néhány modern technikai eszközt (pl. projektor, digitális tábla), de a módszer maradt a régi: frontális osztálymunka. A tanár kiáll előre az osztályterem közepére, és a diákoknak rá kellene figyelniük és a tudását átvenni. Ez a módszer – nevezetesen, hogy a tanár a tudás forrása, a tanulóknak pedig elegendő ebből a forrásból meríteni – hosszú évszázadokon keresztül működött, és elméletileg működhetne ma is, de valamiért még sincs így.

A tudás alapú társadalom kialakításában az állampolgároknak természettudományos műveltségre is szükségük van. Természettudományos műveltség nélkül nem létezik hosszú távon sikeres társadalom. A természettudományos műveltség alapjainak lerakása értelemszerűen a természettudományok iskolai oktatásának feladata. Az Európai Unió számos tagállamában vannak problémák természettudományos tantárgyak oktatásával kapcsolatban, hazánk sem kivétel ez alól.

Mit tehetünk mi, egyszerű pedagógusok, a sikerebb természettudományos oktatás megvalósítása érdekében? A ránk bízott tanulókkal meg kell értetnünk, hogy miért fontos tudni a természettudományokat, és meg kell szerettetnünk az adott szaktárgyat. Ha sikerül felkelteni a diákok érdeklődését, akkor a jövőben lesz majd elég fizika vagy kémia szakos tanár, és lesz majd elegendő műszaki szakemberünk, mérnökünk, orvosunk is.

Nem létezik egyetlen helyes nevelési-oktatási módszer. Léteznek módszerek, amelyeket a megfelelő helyen, időben és arányban alkalmazva van esély arra, hogy (részben) elérjük pedagógiai céljainkat. A dolgozatomban egy ilyen módszert, a projekt módszert szeretném bemutatni. Az iskolánkban már több mint másfél évtizede sikeresen alkalmazzuk a tanítási-tanulási folyamat színesebbé tételére.

Az információs technológia hatalmas léptékű fejlődése hatással van az iskolai oktató munkára is. Az informatika alkalmas lehet arra a szerepre, hogy az oktatási rendszerben egyfajta kapocsként működjön egyfelől a tantárgyak között, másfelől a gyermekek és a pedagógusok között is; segítségével olyan feladatokat is megoldhatunk, amelyek a korábbiakban elképzelhetetlenek voltak. Az információs technológiák alkalmazása lehetőséget teremt arra, hogy a tanítási-tanulási folyamatot kibővítsük, színesítsük, részben új alapokra helyezzük. A dolgozatomban erre is mutatok példákat.

A dolgozatban az általam kidolgozott projektfeladatok részleteit ismertetem. Bemutatok néhány iskolai projektet, amelyekben több természettudományos tantárgy szervesen összekapcsolódott. Pedagógiai szempontból főként arra fókuszálok, hogy megmutassam a projekt módszerben rejlő lehetőségeket.

Minden iskolai projektben az a közös, hogy a céljuk a diákok aktivitásának növelése. Az évek során szerzett tapasztalataim alapján úgy vélem, hogy gyakorlatilag minden természettudományos tantárgy oktatásában használható a projekt módszer. A kidolgozott tudás-átadási módszer alkalmas lehet a természettudományos tantárgyak népszerűsítésére az oktatási rendszer különböző szintjein.

# **1. A természettudományos tantárgyak oktatása**

Az Európai Unió kormányfőinek 2000-ben Lisszabonban tartott találkozásán megfogalmazták, hogy az EU szempontjából létkérdés a versenyképes tudás alapú gazdaság megteremtése; ez azonban csak úgy valósítható meg, ha versenyképes tudás alapú oktatásban és képzésben részesülnek az Európai Unió állampolgárai [1]. A megfelelő természettudományos ismeretekkel rendelkező személyek tudnak csak érett és felelősségteljes döntéseket hozni [1]. A célok megvalósítása érdekében azt tervezték, hogy 2010-re az EU-ban a GDP 3%-át szentelik a kutatási területek finanszírozására. Azóta eltelt több mint másfél évtized, de a célokat csak részben sikerült megvalósítani.

## **1.1. A természettudományok oktatási helyzete**

A PISA vizsgálatokban (Programme for International Student Assessment = Program a tanulók nemzetközi értékelésére) a világ különböző részein élő tizenöt éves diákok olvasási és szövegértési képességét, matematikai és természettudományos műveltségét mérik [2]. Maga a vizsgálat az OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development = Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet) kezdeményezésére jött létre [3].

A PISA felmérésekben tudatosan olyan komplex feladatokat állítanak a diákok elé, amelyek nem oldhatók meg egyetlen tantárgy vagy képlet ismeretével. A feladatok többsége nem nehéz a szó klasszikus értelmében, de a megoldásukhoz tantárgyakon átívelő gondolkodási képességre van szükség. A tanulók a korábban megszerzett tudáshalmazukból merítve, a tudásmorzsákat szintetizálva tudják a problémákat megoldani, nagyon hasonlóan ahhoz, ahogy az életben is többségében összetett problémák jelentkeznek, melyekre nincs sablonválasz. A PISA mérések eredményei kiértékelésének fontos megállapítása, hogy Magyarországon az iskolák színvonala között hatalmas különbségek vannak [4]. A magyar iskolák jellemzője, hogy a családi szociokulturális háttér hiányosságait csak kevéssé, vagy egyáltalán nem tudják kompenzálni az oktatási-nevelési intézmények. A magyar oktatási rendszer az iskolák eltérő színvonala miatt szegregációt idéz elő, amely tovább növeli az egyébként is erős társadalmi különbségeket [4]. A dolgozatomban bemutatásra kerülő projektmódszer alkalmas lehet a szegregáció csökkentésére, az integráció erősítésére is.

Az elmúlt évek általános tapasztalata, hogy a magyar diákok sajnos nem remekeltek a PISA teszteken, nagyjából a középmezőnyben végeztek a felmérésekben. Hiba volna, ha nem vennénk komolyan a vizsgálatok eredményeit, hiszen látható, hogy a magyar diákok képességei fejlesztésre szorulnak. Azonban ne essünk át a ló túlsó oldalára se! Ha csak a kompetenciák megszerzését tűzzük ki célul, akkor lehet, hogy az elkövetkező vizsgálatokon jobban fogunk szerepelni, de nem hihetjük, hogy ez az oktatás-nevelés egyetlen mércéje.

Az iskolában megszerzendő tudás és a fejlesztendő kompetenciák, készségek között kell megtalálnunk az arany középutat, melynek eredményeképpen a tanulók a lehető legjobban fognak majd boldogulni az életük folyamán; hozzátéve azt is, hogy igazából csak az alapokat tesszük le az iskolákban, mivel mindenki számára csak az élethosszig tartó tanulással képzelhető el a sikeres, eredményes jövő.

2007-ben hozták nyilvánosságra a Rocard-jelentést, melyben az Európai Unióhoz tartozó országokban a természettudományos oktatás helyzetét vizsgálták [5]. A Rocard Bizottság, más tanulmányokkal összhangban rámutatott, hogy az EU tagállamokban szinte egységesen csökkent a mérnöki pályát választó, a műszaki felsőoktatásra jelentkező fiatalok száma, és a természettudományos szakokra jelentkezők is egyre kevesebben vannak; a fiatalok nagy része nem érdeklődik sem a természettudományos tantárgyak, sem a matematika iránt [6, 7]. Folyamatosan csökken a természettudományos érdeklődés a tanulók körében; habár a (felnőtt) lakosság jelentős része tudatában van annak a ténynek, hogy ezen ismeretekre, illetve szakképzettségre szükség van, vagy legalábbis szükség lenne [5, 6].

Elengedhetetlen a természettudományos tantárgyak oktatásának megújítása, hiszen Európa jövője szempontjából döntő, hogy a természettudományos oktatás fejlődjön [5, 6]. A természettudományos iskolai projektfeladat részben megfelel e céloknak. A dolgozatban a céloom, hogy bemutassam a természettudományos oktatásban alkalmazott kooperatív projektfeladatok néhány pedagógiai tapasztalatát.

A fiatalok körében tapasztalható hanyatló természettudományos érdeklődés legfőbb okaként a Rocard Bizottság a természettudományos tantárgyak oktatási módszerét teszi felelősnek [5]. Véleményük szerint a legfontosabb újítás a pedagógiai megközelítésben az lehet(ne), ha sikerül(ne) a hagyományos deduktív oktatásról áttérni a kutatás (érdeklődés) alapú természettudományos oktatásra (IBSE=Inquiry Based Science Education). Szokták ezt IBL-nek (Inquiry Based Learning = kutatás, vagy érdeklődés alapú tanulás) nevezni, vagy esetleg IBT-nek (Inquiry Based Teaching = kutatás, vagy érdeklődés alapú tanítás). Mind az általános, mind a középiskolában ez lehet a módja annak, hogy megfelelően motiváljuk a tanulókat, akár a leggyengébb képességűekről, akár a legtehetségesebbekről is legyen szó; de a felsőoktatásban is célravezető lehet [5, 6].

A gyakorlatban a hagyományos megközelítés és az érdeklődés alapú módszer nem zárják ki egymást teljes mértékben, a megfelelő helyen és időben alkalmazva mindkettőnek helye van az oktatásban. Az IBL lehetőséget biztosít a tanárokon és tanulókon kívül a szülőknek, cégeknek, vállalatoknak, egyesületeknek, helyi szervezeteknek is, hogy bekapcsolódjanak az oktatási folyamatba. Az IBL jelenthet terepmunkát, kísérletezést, tanári vezetés mellett végzett önálló vagy csoportos munkát, tantárgyakon átívelő projektmunkát, problémaközpontú megközelítést [5]. A matematikában ezt probléma alapú tanulásnak nevezik (PBL = Problem Based Learning),

melyben a probléma megoldása a tanulás hajtómotorja. Az IBL-re tekinthetünk úgy, mint a PBL kiterjesztésére a természettudományok területén [8]. Javítja a tanulók verbális kifejező-készségét, az írásos munkavégzésüket, sőt megtanítja őket csoportban dolgozni, ami a jövőjük szempontjából is fontos. Az érdeklődés (kutatás) alapú oktatás kiegészítője vagy alternatívája lehet a hagyományos elvű megközelítésnek. Az IBL módszer alkalmazásával a diákok könnyebben befogadják a természettudományos ismereteket, szívesebben vesznek részt projektmunkában, és az önbizalmuk is erősödik [5- 8].

Csökkenteni kell a természettudományos oktatás költségeit azáltal, hogy kevésbé specifikus, olcsóbb anyagokat használunk fel! A projektekben arra kell törekednünk, hogy olcsó és egyszerűen kivitelezhető kísérleteket végezzenek a tanulók [5]. Ezekkel is megtanítható a fizika vagy más természettudományos tantárgy. A mai költségtakarékos világban szinte csak ez lehet a járható út, hogy a diákok nagy tömegei végezdhessenek kísérleti megfigyeléseket, méréseket [5]. A tanulók egy szűkebb rétege számára ma is rendelkezésre állnak drága, modern berendezések, műszerek, alapanyagok, és ez így lesz a jövőben is. Sajnos a többség számára nincsenek meg ezek az optimális körülmények, ezért nagyon fontos, hogy a tanulóknak azt tudatosítsuk, hogy az egyszerű kísérletekből is rengeteg új ismeretet lehet megszerezni.

A változatos tanítási módszerek (frontális osztálymunka mellett vagy helyett csoportmunka, egyéni differenciált feladatok, stb.) a tanulók természetes kíváncsiságát, érdeklődését kell kihasználnunk; másrészt kisebb-nagyobb projektjellegű feladatokkal színesíthetjük a tanulók ismeretszerzési folyamatát. Ezek lehetnek egy adott szaktárgyon belül is; de tervezhetünk tantárgyak felett átívelő, ún. multi- (inter-) diszciplináris projekteket [5 - 8]. Kiváló módszer arra, hogy a tanulók megismerkedjenek a mindennapi élet problémavezérelt, célorientált gondolkodási és cselekvési folyamataival. Közben pont azok a tanulói kompetenciák fejlődnek (pl. tudjon csapatban dolgozni, a többiekkel együttműködni), amelyekre ténylegesen szüksége van az egyénnek a társadalomban, a gyakorlati (hétköznapi) életben. A dolgozatomban több ilyen projektjellegű fizikai mérési és vizsgálati feladatot mutatok be részletesen. A projektek célja az volt, hogy a tanulók fizikai ismereteinek bővítése mellett egyrészt az alkalmazott informatikai, másrészt a team-munka jellegű képességeik és készségeik is fejlődjenek [B1].

Az utóbbi években egyre több fórum foglalkozik a természettudományos tantárgyak oktatásának aggasztó állapotával. „*A különböző hazai és nemzetközi tudásszintmérő tesztek eredményei szerint Magyarországon egyre romlik a tanulók teljesítménye a természettudományi műveltség területén.*” – írja Radnóti [9]. 2008-ban a közoktatásért felelős miniszter tanácsadó testülete, az Országos Köznevelési Tanács (OKNT) napirendre tűzte a természettudományos közoktatás helyzetének átfogó vizsgálatát. A bizottság megvizsgálta a természettudományos oktatás hazai helyzetét és javaslatokat fogalmazott meg a problémák megoldására [10].

A tanárképzés tekintetében aggasztó helyzet alakult ki. A Bologna-rendszer bevezetése a természettudományos tanárképzést súlyosan érintette [11]. Bizonyos természettudományos szakokra rendkívül kevesen jelentkeztek; féltő (volt), hogy nem lesz utánpótlása az oktatási rendszerből távozó, nyugdíjba vonuló fizika és kémia szakos tanároknak. (A tanárképzés területén azóta megszüntették a Bologna-rendszer osztott ciklusú képzési formáját. Remélhetőleg ez érezhető javulást hoz néhány éven belül.)

A Nemzeti Alaptanterv (NAT) 2012-es módosítása jelentősen érintette a természettudományos tananyagot. A módosításokkal kapcsolatban oktatási szakemberek, kutatók, tudományos szervezetek is kifejtették véleményüket [12, 13, 14]. A változások nagymértékben befolyásolják a természettudományos oktatás jelenlegi helyzetét, de területi korlátok miatt a dolgozatomban nem foglalkozom a témával részletesen.

A szakmai javaslatoknak néha sajnos kevés hatásuk van, hiszen sokszor politikai okok miatt késve, vagy csak részlegesen valósulnak meg. Egy egyszerű pedagógusnak ebbe már nagyon kevés beleszólása van. A következő részfejezetben ezért egy olyan témakörrel szeretnék foglalkozni, amibe nekünk, természettudományokat tanító pedagógusoknak is érdemi beleszólásunk lehet.

## **1.2. A motiváció szerepe**

A diákok képességei, készségei csak úgy tudnak optimálisan kibontakozni, a tudásuk csak úgy tud elmélyülni, ha a személyiségüket folyamatos ösztönző, bátorító közeg veszi körül. Ennek a motiváló környezetnek a megteremtése nagyrészt a pedagógusok feladata, természetesen a szülőkkel összefogva. *„A természettudományok megértése munkaiigényes, hosszú folyamat: a tudomány fejlődése miatt itt is kulcskérdés az egész életen át tartó tanulás igényének kialakítása, emiatt a motiváció lényeges kérdés.”* – írja Réti [15].

A tanítás során törekednünk kell arra, hogy a tanulók mindig motiváltak legyenek. Ha ez teljesül, akkor szinte gyerekjáték megtanítani nekik a fizikát, vagy másik természettudományos tantárgyat, sőt az összes tantárgy tanításának ez a kulcsfontosságúja. Változatos tanítási módszereket alkalmazva (frontális osztálymunka mellett vagy helyett csoportmunka, egyéni differenciált feladatok, projektrendszerű megközelítés, stb.) a tanulók természetes kíváncsiságát, érdeklődését kell kihasználnunk; a tanulók tanórai, illetve tanórán kívüli aktivitását kell magasabb szintre emelni.

A tanulói aktivitáson alapuló módszerek – sem idehaza, sem külföldön – nem eléggé elterjedtek a mindennapok természettudományos oktatásában [16, 17]. Ha sikerül elérnünk, hogy a tanulók konstruktív módon álljanak az adott tantárgy tanulásához, akkor ezzel a diák és a tanár munkájának hatásfoka is növekszik [16]. Kopasz és Papp szerint a nemzetközi átlagnál is jóval kisebb mértékben alkalmazzák hazánkban a tanárok azokat a tanítási módszereket, amelyek fokozott tanulói aktivitást igényelnek [17].



Az egész nevelési-oktatási folyamatnak talán legfontosabb aspektusa a pedagógus személye, személyisége [5]. Ebbe beletartozik a szakmai felkészültségtől kezdve a módszertani változatosságon át a gyermekközpontú szemléletmódig minden momentum.

A természettudományos oktatás megújításának a pedagógusok a kulcsszereplői, ezért első lépésként az ő motiváltságukat kell elérni [5]. Magától értetődő, hogy csak a motivált pedagógus tud úgy ismereteket közvetíteni és személyes példát mutatni, hogy a tanítványaiban is felébredjen a motiváció, és aktív szereplői legyenek a nevelési-oktatási folyamatnak, ahelyett hogy passzív módon elviselnék, netán elszenvednék azt. A kevésbé motivált tanároknak új pedagógiai ismeretekre van szükségük, hogy képesek legyenek elsajátítani és oktatni az érdeklődésen alapuló módszerrel [5].

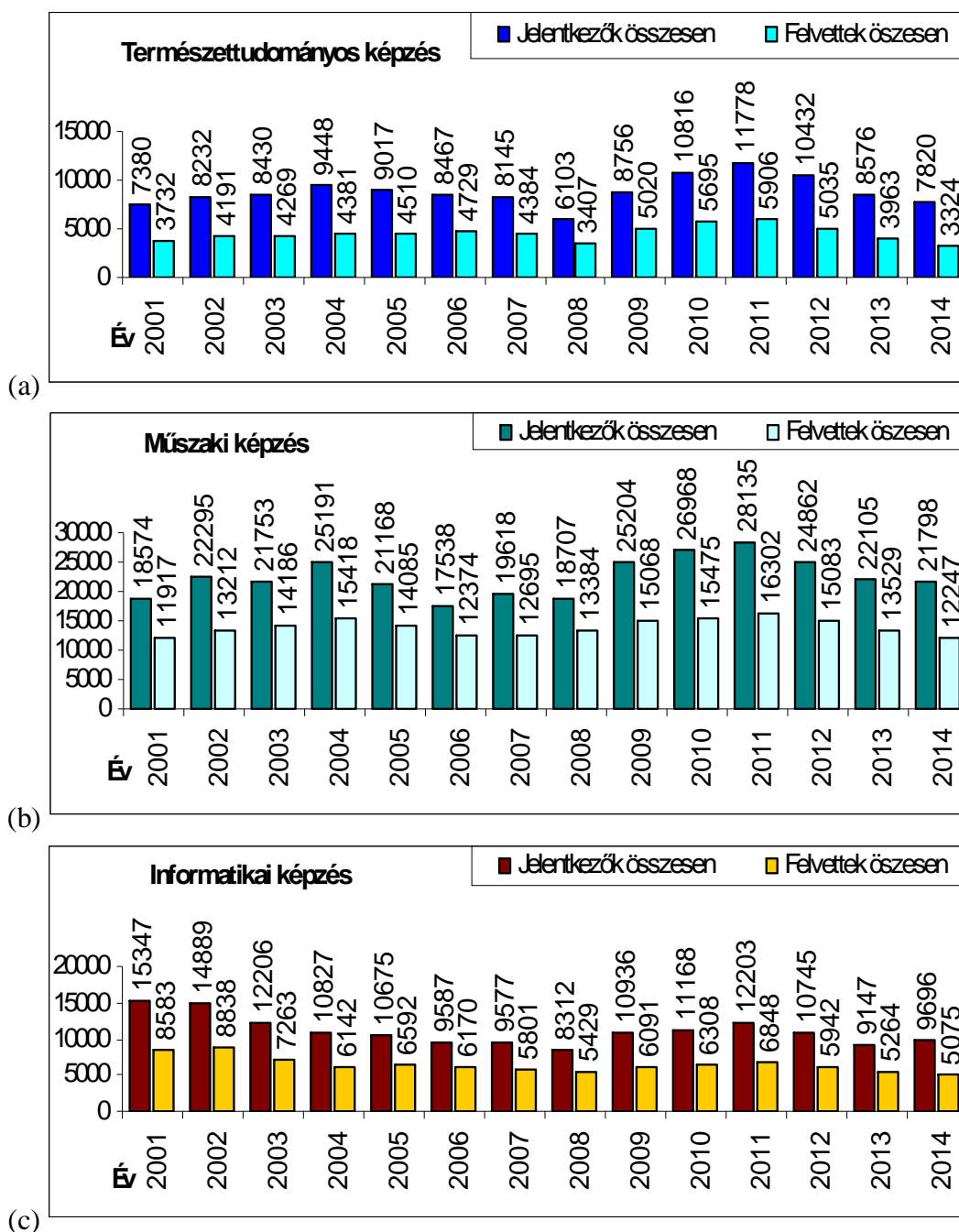
A természettudományos oktatás fejlesztése mérföldkő a technológiai újítások megértése, a környezetünk megóvása és a gazdaság fejlesztése szempontjából is. Olyan nyitott, befogadó környezetet kell teremtenünk elsősorban az iskolákban, amely minden gyerek számára ösztönzően hat a természettudományos kíváncsiság kibontakoztatása tekintetében. Szinte az összes gyerekben természetes kíváncsiság él a természet dolgaival kapcsolatban; egészen addig, amíg a helytelenül megválasztott tanítási módszerekkel ezt ki nem irtjuk belőlük [5]. Egyszóval sok esetben a rossz tanítási módszer az, ami a legtöbbet árt.

A tanárok egy része a kréta fizikát kedveli, vagy legalábbis ezt alkalmazza; amikor kiáll az osztály elé, teleírja a táblát képletekkel, és ugyanezt várna el a tanítványaitól is. Az érdeklődésen alapuló természettudományos oktatás lényege pontosan az, hogy a gyermekekben meglévő kíváncsiságot, mint motiváló erőt használjuk fel arra, hogy a tanulók ismereteit gyarapítsuk, látókörüket szélesítsük. Ez valószínűleg nem működik akkor, ha kizárólagosan a hagyományos frontális osztálymunkát alkalmazzuk. Ezt a módszert sem kell elfelejteni, de mellette sok egyéb lehetőségünk is van, amit érdemes kihasználni. Tulajdonképpen nem az a fizika (kémia, stb.) oktatás lényege, hogy százszámra képleteket magoltatunk be a diákokkal; sokkal inkább egy átfogó és lehetőleg korszerű tudományos világnézet kellene a gyerekekben kialakítani, kinek-kinek a saját értelmi szintjén. Természetesen nem a képletek mellőzését akarom ezzel elérni. Szükség van rájuk a maguk helyén és idején, de ne ez legyen az oktatás legfontosabb üzenete. Az érdeklődésen (kutatáson) alapuló tanulás-tanítás lehet a kivezető út, amelyhez elsősorban a pedagógusokat kell megnyerni. A sikeresen kipróbált pedagógiai módszereket be kell mutatni minden tanár számára, hogy a szakmai munkájukban felhasználhassák az eredményeket. A dolgozatom megírásának ez volt az egyik pedagógiai célja.

### **1.3. A fizika és az informatika tantárgy helyzete**

A médiában az ezredforduló óta legtöbbször csökkenő természettudományos érdeklődésről hallhattunk. A korábbi híreknek ellentmondó információk is megjelentek 2014-ben: egyes nyári hírek szerint, egyre több tanuló érdeklődik a természettudományos és a műszaki felsőoktatás iránt.

Ha ténylegesen egyre többen jelentkeznének természettudományos és műszaki jellegű szakokra, az örvendetes lenne. A Felvi.hu [18] és az Eduline.hu [19] weboldalakon található statisztikákat átnézve azonban nem látszik, hogy lényeges növekedés lett volna a természettudományokhoz kapcsolódó szakirányokra jelentkezők számában, 2014-ben. A [18] adatai alapján készítettem 3 oszlopdiaagramot, melyek a 2001 és 2014 közötti időszakban a természettudományos, a műszaki és az informatikai szakirányokba jelentkezők számát és a ténylegesen felvettek számát mutatja [B1]. A diagramok alapján azt láthatjuk, hogy 2010-2011 tájékán tényleg volt valamekkora emelkedés a jelentkezések és a felvételek számában is; de az elmúlt néhány évben inkább csökkent a természettudományos, a műszaki és az informatikai szakirányokra jelentkezők száma és a felvettek száma is (1.1. ábra).



**1.1. ábra** 2001 és 2014 között a felsőoktatásba jelentkezők és a ténylegesen felvettek száma :  
 (a) természettudományos szakirány, (b) műszaki szakirány, (c) informatikai szakirány.

## **Érettségi eredmények**

Arra gondoltam, hogy a természettudományos, a műszaki és az informatikai szakirányú felsőoktatásba jelentkezők száma helyett (mellett) az érettségizők számát és teljesítményét fogom megvizsgálni az elmúlt néhány évben [B1].

Hazánkban az érettségi vizsga már a XIX. század közepe óta létezik; az elmúlt bő 160 év alatt sokszor változott. Alapjában az érettségi vizsga egy olyan kimeneti értékelési rendszer, amely a középiskolai tanulmányok lezárására szolgál. A kétszintű érettségi bevezetése (2005) óta az érettségi vizsga alapján történik a felsőoktatásba jelentkezők szelektálása is; legalábbis nagyrészt.

Igaz ugyan, hogy nincs közvetlen kapcsolat az érettségizők száma és a felsőoktatásba jelentkezők száma között, de véleményem szerint az adott tárgyból érettségit választók száma is mutatja (közvetve ugyan), hogy melyik tantárgy mennyire népszerű.

Feltételeztem, hogy az adott tantárgyból érettségizők száma korrelál azzal, hogy hányan jelentkeznek olyan irányú felsőoktatási szakokra, ahol ez az érettségi vizsgatárgy követelmény, vagy választható a felvételi során. A kötelező (magyar nyelv és irodalom, matematika, történelem, esetleg nemzetiségi nyelv) és a kötelezően választható (idegen nyelv) érettségi vizsgatárgyak esetén a helyzet nem ilyen egyszerű, de a szabadon választható érettségi vizsgatárgyak esetén szerintem ez reális feltételezés. (Szakközépiskolában lehet más kötelezően választható vizsgatárgy is.)

Néhány évvel ezelőtt volt egy olyan elképzelés (tervezet), mely szerint az érettségi vizsgán kötelező lesz egy természettudományos vizsgatárgyat választani. Ebből azonban nem lett semmi. Sajnos még a pedagógus berkekben sem egyértelmű mindenkinek, hogy nincs kötelezően választható természettudományos érettségi vizsgatárgy [20]. Lehet, hogy érdemes lett volna bevezetni, de ez már más lapra tartozik.

Mivel fizikát és informatikát tanítok, ezért elsősorban e tárgyak érettségi statisztikai adatai érdekeltek. A legtöbb középiskolában a fizika és az informatika a szabadon választható érettségi vizsgatárgyak közé tartozik. A fizika a klasszikus természettudományos tantárgyak egyike. Az informatika nem tartozik ebbe a körbe, de a modern természettudományos és műszaki pályákhoz gyakorlatilag elengedhetetlen az informatika ismerete. (A felvételi követelményekben sokszor informatika érettségit is elfogadnak a klasszikus természettudományos érettségi vizsga helyett.)

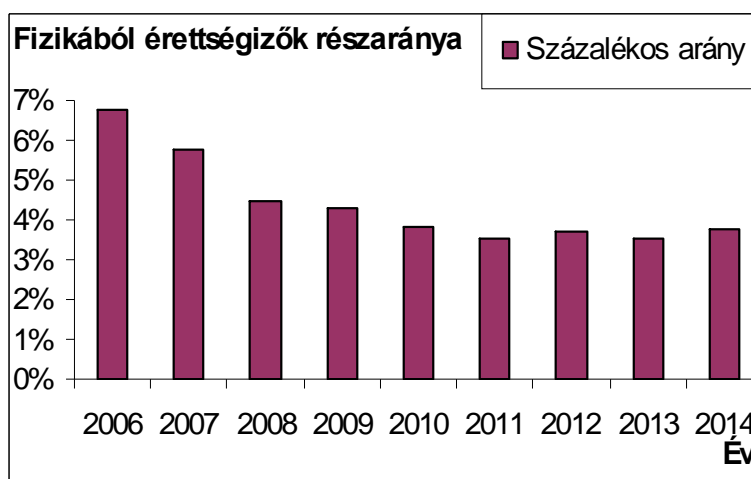
### Fizika

Fizikából kevesen választották a középszintű vagy az emelt szintű érettségit az elmúlt években. Az Oktatási Hivatal (OH) honlapján megtalálhatók 2006-tól kezdődően a kétszintű érettségi statisztikai adatai. Az OH [21] adatai alapján készítettem az 1.1. számú táblázatot, mely részletesen tartalmazza a 2006 és 2014 közötti időszakban fizikából érettségizők számát és a vizsgákon elért átlagos teljesítményüket.

**1.1. táblázat** Fizikából érettségizők adatai 2006 és 2014 között.

Fizika érettségi	Május-június					Október-november					
	Év	Összes nyilvántartott és vizsgát tett személy	Középszint db	Középszint %	Emelt szint db	Emelt szint %	Összes nyilvántartott és vizsgát tett személy	Középszint db	Középszint %	Emelt szint db	Emelt szint %
	2006	119260	7131	60,78%	1548	70,12%	12501	194	69,70%	50	73,66%
	2007	124443	6520	56,81%	1238	69,28%	14025	208	64,17%	22	67,64%
	2008	124122	5224	62,57%	680	75,63%	14476	242	70,54%	20	79,75%
	2009	136202	5683	64,15%	512	76,00%	15594	285	79,21%	24	71,42%
	2010	138180	4903	64,58%	604	73,66%	16610	380	72,02%	29	71,66%
	2011	141286	4517	67,22%	711	71,33%	17437	303	82,99%	40	74,25%
	2012	136250	4313	64,42%	1033	69,47%	16306	232	78,69%	41	69,68%
	2013	131696	3790	69,52%	1285	65,35%	19526	223	75,85%	49	71,47%
	2014	116939	3343	68,59%	1331	69,35%	8080	27	68,41%	25	64,28%

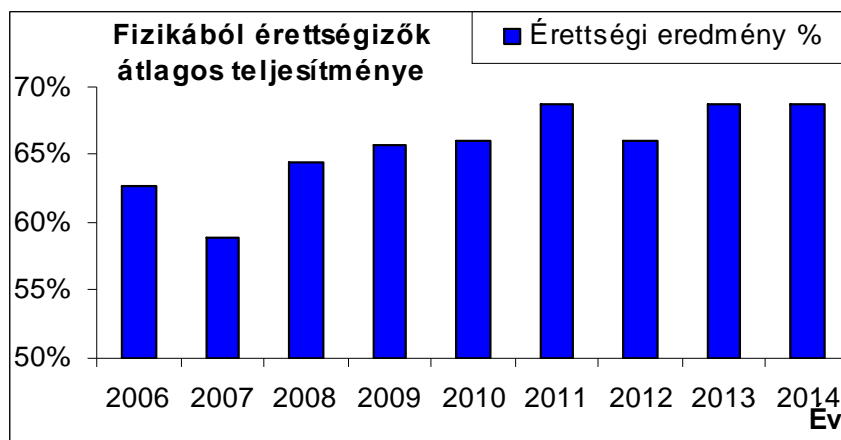
Az egyes években az összes érettségiző számában akár több tízezres különbségek is vannak, ezért célszerűbb a fizikából érettségizők részarányát nézni. A könnyebb összehasonlíthatóság kedvéért minden évre kiszámoltam a közép- és emelt szinten fizikából érettségizők együttes részarányát, a május-júniusi és az október-novemberi vizsgaidőszakokra egyben (1.2. ábra).



**1.2. ábra** Fizikából érettségizők részaránya 2006 és 2014 között.

2011-ig nagyjából monoton módon csökkenő tendenciát mutat a fizikából érettségizők részaránya; 2012-től kisebb javulást láthatunk. A statisztikai adatok alapján – sajnálatos módon – a tanulók kis része vállalkozik a fizika érettségire. (A 2006 és 2014 közötti időszakban a fizika érettségit a vizsgázók 4,40%-a választotta átlagban.)

Minden évre kiszámoltam a közép- és emelt szinten fizikából érettségizők súlyozott érettségi átlagteljesítményét is, a május-júniusi és az október-novemberi vizsgaidőszakokra egyben. Ez látható az 1.3. ábrán.



1.3. ábra Fizikából érettségizők súlyozott átlagteljesítménye 2006 és 2014 között.

A súlyozott érettségi átlagteljesítmények fizikából közelítőleg 59% és 69% közötti értékek voltak az egyes években. A súlyozott átlagteljesítmények tekintetében csekély mértékű javuló tendencia figyelhető meg a vizsgált időszakban, ami legalább egy kicsit biztató jel. A 2006 és 2014 közötti időszakban a fizika érettségin a súlyozott átlagteljesítmény 65,56% volt. (Az igaz, hogy a különböző években az egyes vizsgaidőszakokban nem pontosan ugyanolyan nehézségű feladatsorokat állítanak össze az érettségi feladatkitűző bizottságokban, de azért közelítőleg hasonló a feladatsorok nehézségi foka.)

#### Informatika

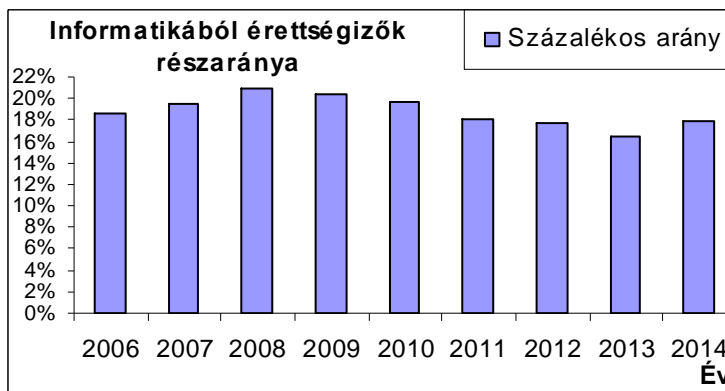
Az OH [21] adatai alapján készítettem az 1.2. számú táblázatot, mely részletesen tartalmazza a 2006 és 2014 közötti időszakban informatikából érettségizők számát és a vizsgákon elért átlagos teljesítményüket.

1.2. táblázat Informatikából érettségizők adatai 2006 és 2014 között.

Informatika érettségi	Május-június					Október-november				
	Összes nyilvántartott és vizsgát tett személy	Középszint db	Középszint %	Emelt szint db	Emelt szint %	Összes nyilvántartott és vizsgát tett személy	Középszint db	Középszint %	Emelt szint db	Emelt szint %
2006	119260	22124	59,71%	1390	56,27%	12501	989	67,03%	43	62,02%
2007	124443	24653	64,49%	1204	60,60%	14025	1028	59,89%	51	69,53%
2008	124122	26965	56,67%	950	59,40%	14476	1147	64,68%	45	75,58%
2009	136202	29018	59,30%	821	62,57%	15594	1184	65,76%	63	73,44%
2010	138180	28159	58,84%	795	62,25%	16610	1325	69,23%	80	59,9%
2011	141286	26460	58,14%	944	61,20%	17437	1056	71,15%	73	77,86%
2012	136250	24431	60,35%	1505	65,25%	16306	950	68,79%	91	74,77%
2013	131696	22322	52,57%	1400	67,47%	19526	1169	66,18%	105	71,46%
2014	116939	20433	54,35%	1512	60,45%	8080	282	45,97%	80	70,66%

Láttuk, hogy az egyes években az összes érettségiző számában akár több tízezres különbségek is vannak, ezért informatikából is célszerűbb az érettségizők részarányát nézni.

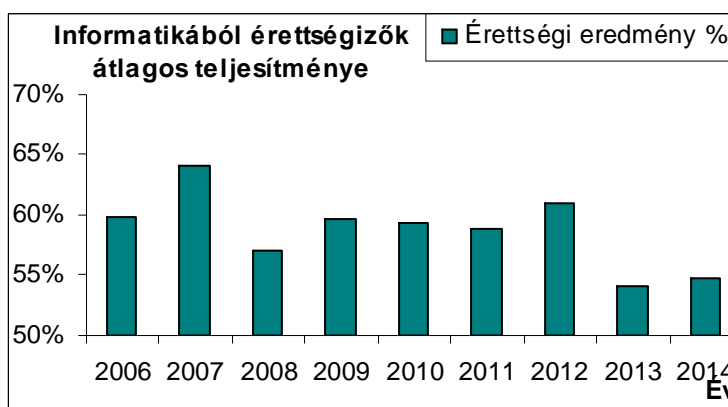
A könnyebb összehasonlíthatóság kedvéért minden évre kiszámoltam a közép- és emelt szinten informatikából érettségizők együttes részarányát, a május-júniusi és az október-novemberi vizsgaidőszakokra egyben (1.4. ábra).



**1.4. ábra** Informatikából érettségizők részaránya 2006 és 2014 között.

2006 és 2008 között monoton módon növekedett az informatikából érettségizők részaránya; 2009 és 2013 között monoton módon csökkent az informatikából érettségizők részaránya. 2014-ben növekedett az arány, az előző évhez viszonyítva. Látható, hogy kb. négyszer annyian választják az érettségit informatikából, mint fizikából. (A 2006 és 2014 közötti időszakban az informatika érettségit a vizsgázók 18,80%-a választotta átlagban.)

Minden évre kiszámoltam a közép- és emelt szinten informatikából érettségizők súlyozott érettségi átlagteljesítményét is, a május-júniusi és az október-novemberi vizsgaidőszakokra egyben (1.5. ábra).



**1.5. ábra** Informatikából érettségizők súlyozott átlagteljesítménye 2006 és 2014 között.

A súlyozott érettségi átlagteljesítmények közelítőleg 54% és 64% közötti értékek voltak az egyes években. A 2006 és 2014 közötti időszakban az informatika érettségin a súlyozott átlagteljesítmény 58,74% volt. Ez 6,82%-kal gyengébb átlagot jelent, mint a fizika érettségik átlagteljesítménye. Ennek ellenére sokkal népszerűbb az informatika érettségi, mint a fizika.

Miért gondolhatta a média egy része 2014 nyarán, hogy a természettudományos tantárgyak (általánosságban) újra népszerűbbek, mint korábban? A természettudományos tantárgyakból érettségizők együttes részaránya azért növekedett meg valamelyest a 2014-es évben, mert ettől az évtől előrehozott érettségi vizsgát csak idegen nyelvekből, illetve informatikából lehet tenni.

Ha az előző évhez viszonyítunk, akkor az előrehozott informatika érettségik magasabb száma emelte meg a természettudományos érettségik részarányát. A klasszikus természettudományos tantárgyakból nem volt jelentősebb mértékű változás az előző évhez viszonyítva. Tehát igazából az érettségi vizsgarendszer megváltozása indukálta, hogy több tanuló előrehozott informatika érettségit tett, mert más vizsgatárgyat nem választhatott. Véleményem szerint a klasszikus természettudományos tantárgyak (sajnos) nem lettek sokkal népszerűbbek.

#### **1.4. Mit tehetnek a pedagógusok?**

A statisztikai adatok elemzése alapján láthattuk, hogy a fizika és az informatika tantárgyak nem lettek sokkal népszerűbbek a kétszintű érettségi bevezetése óta, de a többi természettudományos tantárgy esetén is nagyjából ez a helyzet. (Az elmúlt közel egy évtizedben összességében fizikából jelentősen csökkent az érettségizők számaránya, informatikából kisebb mértékű fluktuáció volt megfigyelhető.) Hogyan érhetnénk el, hogy egyre több tanuló válasszon természettudományos tárgyból érettségit, és egyre többen tanuljanak tovább természettudományos, műszaki, informatikai szakirányban?

Elméletben megoldás lehetne, hogy ténylegesen bevezetnék azt a korábbi tervezetet, mely szerint valamely természettudományos vizsgatárgy kötelezően választható része lenne az érettségi vizsgának. Mellette és ellene is voltak (vannak) érvek, de véleményem szerint ez a kérdés jelenleg nem aktuális, ezért ezzel nem foglalkozok.

Egy másik lehetőség, hogy az ország vezetése (kormány, minisztérium) olyan felsőoktatást preferál, ahol a természettudományok jelentősebb támogatást kapnak (megemelt keretszámok, ösztöndíj rendszer, stb.). Ez úgy tűnik, beavatkozás a felsőoktatásba, de néha erre is szükség van, szükség lehet. Ilyen irányú törekvésekkel találkozhattunk az elmúlt években.

Az előbbi két megoldási lehetőség tőlünk független, legfeljebb véleményünk lehet róla. Mit tehetünk mi – egyszerű pedagógusok – a természettudományos oktatás mennyiségi és főként minőségi javításának érdekében? A ránk bízott tanulókkal meg kell értetnünk, hogy miért is fontos tudni a természettudományokat, sőt meg kell szerettetnünk az adott szaktárgyat [B1].

Természetesen – ha korlátok között is – nekünk pedagógusoknak is van döntési szabadságunk. Dönthetünk arról, hogyan tanítsunk, azaz a pedagógiai módszereket részben mi választhatjuk meg. A tananyag nagyobb része adott, de azért itt is van valamekkora mozgástér. A legfőbb szabadságunk azonban az ismeretek átadásának formájában van. Lehet, hogy nem mindig találó kifejezés az ismeret átadásáról beszélni, mert a középiskolában a legmegfelelőbb az lenne, ha nem a pedagógus adná át az ismeretet a diáknak, hanem a tanuló maga szerezne meg az ismeretet, tanári irányítással, segítséggel [B1]. (A felsőoktatásban sok esetben ez is történik.)

A dolgozatom a természettudományos (elsősorban a fizika tantárgyhoz kapcsolódó) projekt módszer alkalmazásáról és jellemzéséről szól. A projekt módszert több éve sikeresen alkalmazzuk az iskolánkban a tanítási-tanulási folyamat színesebbé tételére. A tapasztalataink alapján a projekt módszer segít abban, hogy felkeltsük a tanulóink érdeklődését a természettudományok iránt. Az elmúlt évek folyamán végrehajtott projektek következményeként javult a résztvevő tanulók szaktárgyi teljesítménye; a dolgozatban ezt szeretném részletesebben bemutatni. Azt is tapasztaltuk, hogy a projektekben résztvevő tanulók magukat a természettudományokat is pozitívabban ítélik meg; igyekszem ezt is bemutatni.

A természettudományokra az általános iskolás korú gyerekek a legfogékonyabbak; az ebben az időszakban felkeltett érdeklődés a későbbiekben is kitart, melyre a közép- és felsőoktatás is építhet [22, 23]. Ha tanárként elmulasztjuk a korszak adta lehetőséget kiaknázni, akkor később már csak nehezen hozható helyre a mulasztás [23]. Persze ez sem lehetetlen. Előfordulhat, hogy az általános iskolában a tanuló szinte soha, vagy csak nagyon ritkán találkozott kísérletekkel, vagy érdekes, életközeli példákkal; ezért semmifajta késztetést sem érez a természettudományok mélyebb megismerése iránt [22, 23]. A középiskolában az új tanárának ettől függetlenül (vagy pont ezért) mindent meg kell tennie, hogy megpróbálja megszerettetni, vagy kezdetben legalább elfogadhatóvá tenni az adott szaktárgyat. Nem könnyű azonban egy rossz módszertani kultúra, vagy kultúrátlanság miatt motiválatlan tanulót aktivizálni. Ehhez még a szokásosnál is több erőfeszítést kell tennünk. Természetesen a fordított eset is létezik, amikor a korábbi tündöklő tanár egyéniség után kap a diák egy megszürcült, elfásult pedagógust. Az ideális helyzet az, ha mind a tanár, mind a tanuló megfelelően motivált, és aktív résztvevője kíván lenni a magasabb szintű tudáshoz, megismeréshez vezető útnak. A projekt módszer alkalmazásának az egyik legfontosabb jellemzője, hogy segíti a diákokat és a pedagógusokat is ennek az aktivációs energiának a felszabadításában. Szinte nem tudok elképzelni olyan természettudományos tantárgyat, amelyben ne lehetne hasznosítani a projektpedagógia vívmányait.

## **2. A projektoktatás**

A projekt típusú oktatási forma egyelőre nem terjedt el széles körben Magyarországon, bár vannak iskolák, ahol használják. Reményeim szerint a projektszemléletű oktatás egyre hangsúlyosabb szerepet kap a jövő természettudományos oktatásában. Ezért célszerű összefoglalni és bemutatni a módszer jellemzőit. Hortobágyi meghatározása alapján a projektet tekinthetjük a tanulási folyamat konkrét egységének [24]: *„A projekt egy sajátos tanulási egység, amelynek a középpontjában egy probléma áll. A feladat nem egyszerűen a probléma megoldása vagy megválasztása, hanem a lehető legtöbb vonatkozásnak és összefüggésnek a feltárása, amely a való világban az adott problémához organikusan kapcsolódik.”*



A projektmódszer nem új keletű, hiszen alkalmazása már fellelhető a XIX. század végén, illetve a XX. század elején is, amikor gyermekbarát pedagógiai irányzatok bontakoztak ki, elsősorban Nyugat-Európában és Észak-Amerikában. Az ilyen típusú irányzatok középpontjában a kreatív fejlesztés, a gyermeki gondolkodásból való kiindulás és annak kognitív és érzelmi vonzatai álltak [25 - 30].

A projekt kifejezést pedagógiai értelemben először a XIX. század végén alkalmazták az Amerikai Egyesült Államokban a szakmai oktatáshoz kapcsolódóan; ezt terjesztette ki a későbbiekben Dewey [31] és tanítványa, illetve követője Kilpatrick [32]. A reformpedagógia e jelentős személyiségei többek között a projekt eljárással kívánták a valódi, személyes tanulási tapasztalatokat, a valóságos tevékenység szerepét biztosítani a gyerekektől idegen tantárgyi tartalmak helyett [33].

A projekt a pedagógiában több dolgot is jelent: eszme, oktatás, tanulás, módszer, oktatási stratégia, tanulásszervezési forma [34 - 40]. A projektmódszer fontos jellemzője, hogy akár önmagában is meglehetősen széles módszertani repertoárt biztosíthat a nevelési-oktatási folyamatban [40]. A projektmódszer alkalmazásának fő motívuma, hogy képes fejleszteni a különböző kompetenciák, személyiségvonások széles körét, növeli a tanulók aktivitását [41].

A projekt olyan témaegység, amely a mindennapi élet valamilyen, a diákok által megtervezhető feladatát veszi alapul, és kapcsolódik ehhez a megoldáshoz szükséges elméleti és gyakorlati tudás kialakítása is. A projektfeladat nem csupán a probléma megoldását jelenti, hanem közben olyan összefüggések feltárása is történik, melyek az adott problémához a való életben szervesen kapcsolódnak [40, 41]. A módszer lényege, hogy a diákok szembe kerülnek egy – a mindennapi életből vett – problémával, amelyet a tanulók több szempont szerint is megvizsgálhatnak (pl. műszaki, technikai, fizikai, gazdasági szempontok alapján), és mindezek ismeretében megtervezik a megoldáshoz vezető alternatívákat, majd ezeket kivitelezik és levonják a következtetéseiket [30]. A tanítási-tanulási folyamat középpontjából a tanár kikerül és átadja helyét a tanulóknak [30].

A projektmódszer komplex, vagyis az adott témát sok oldalról kell körüljárni, mert csak így alakulnak ki a tudáselemek között azok a sokrétű kapcsolatok, az a hálózat, amely egy-egy ismeretet, készséget, képességet sokféle helyzetben előhívhatóvá tesz. Ez a ténylegesen alkalmazható tudás kialakulásának egyik fontos előfeltétele [41].

A projekt időstruktúrája szerint megkülönböztethetünk elosztott és folyamatos időtartamú projekteket, ezen belül azonban nagyon széles időskála lehetséges: egy óránál rövidebb, néhány óra, egy napos, többnapos, egyhetes, kéthetes projekt [40, 41]. A folyamatos munkát igénylő projektek esetén ettől hosszabb idő általában nem áll rendelkezésre a hagyományos oktatási rendszerben. Természetesen előfordulhat, hogy egy tanévben több folyamatos időrendű projekt is megvalósul. A nem folyamatos időtartamú projektek esetén a téma feldolgozása során időnként megszakítjuk a munkát, heti néhány órányi tevékenység után visszatérünk a projektre a következő héten, vagy a következő hónapban, esetleg a következő tanévben [40, 41].

## A projekttevékenység megtervezése és végrehajtása

Sokan – külső szemlélők, de akár olyan pedagógusok is, akik még nem vettek részt projekt munkában – úgy vélekednek, hogy a projektoktatásban a tanárnak semmi, vagy legalábbis nagyon kevés dolga van. Ez súlyos tévedés, bár azt elismerem, hogy ha gondosan előkészítettük a projektet, akkor egy idő után remélhetőleg tényleg gördülékenyen mennek a dolgok, és a diákok szinte varázsütésre, maguktól tudják, hogy mit kell tenniük. Ehhez azonban nem szabad szem elől tévesztenünk, hogy a projektszerű oktatás nagyon gondos tervezést és előkészítést igényel [40, 41]. Tisztáznunk kell a projekt elején számos fontos dolgot.

Egy projekt megvalósításának lépései, folyamatai: tervezés, szervezés, kivitelezés, értékelés. A projekt-téma meghatározásának több módja van [41]:

- a tanulók, tanulócsoportok érdeklődésük alapján teljesen maguktól, vagy tanári ösztönzésre, de mégis maguk határozzák meg;
- közös élményből vagy gondolatcseréből születik;
- egy korábbi téma feldolgozását követően vetődik fel;
- a pedagógus határozza meg a témát.

A projektszerű oktatás nagyon gondos tervezést és előkészítést igényel [40, 41, B2]:

- Mi a projekt célja? Ez lehet egy konkrét munkadarab elkészítése, egy mérésorozatot, vagy kísérlet elvégzése, stb.; ezen keresztül különböző készségeket, képességeket, kompetenciákat szeretnénk fejleszteni, tehát a nevelés-oktatás szempontjából ez az elsődleges cél.
- Hogyan, milyen formában kell a végén a projektterméket beadni; pl.: kell-e mindenkinek prezentációt készíteni, vagy csoportonként csak egyet?
- Kik vesznek részt a projektben?
- Milyen szempont alapján állítjuk össze a projekt csoportokat? Ideális esetben a tanulók maguktól olyan csoportokat alakítanak ki, melynek tagjai jól együtt tudnak működni. Ez persze nem mindig sikerül. Ilyenkor a tanárnak kell valamilyen kompromisszumos megoldással összeállítani a csoportokat.
- Ha megvannak a csoportok, következhet a szerepek kiosztása, azaz ki miért felel a csoportmunka során.
- Milyen erőforrásokra (alapanyagok, eszközök, mérőműszerek, stb.) van szükség előreláthatólag a projekt megvalósításához?
- A projektcél eléréséhez mennyi idő áll rendelkezésre? Kisebb projekt esetén elegendő a végső határidőt megadni; összetettebb feladat esetén célszerűbb, ha a részfeladatok elvégzését is időpontokhoz kötjük, ez segít abban, hogy a teljes projekt határidőre elkészüljön.

A projektfeladatokat legcélszerűbb csoportmunkában megoldani. Létezik egyszemélyes projekt is (pl. vizsgamunka), vagy pármunka, de az iskolai projektekben általában néhány fős csoportokban tevékenykednek a diákok. Közben a tanárnak minden csoportra ügyelni kell, hogy mindenhol rendes ütemben haladjanak a tanulók a projektcél elérése felé, de ez a tanári szerep már nem a hagyományos oktató szerep [40, 41].

A projekt megvalósítása során a pedagógus sokkal inkább egy külső tagja (póttagja) minden csoportnak, egyfajta mentorálási feladatot végez úgy, hogy lehetőleg nem avatkozik bele direkt módon a csoportmunkába. Ez persze néha elkerülhetetlen, de alapvetően hagyni kell a gyermekeket kibontakozni, ha maga a projekt jó irányba halad. A megfelelően előkészített és kivitelezett projektfeladat megoldása közben a gyermekeknek pont azok a tulajdonságai, képességei, készségei, kompetenciái fejlődnek, amelyre az életük további részében szükségük lesz: pl. kommunikáció, információ-feldolgozás, együttműködés, feladatmegosztás [40, 41].

### **3. SZAVFIT projektek**

Az elmúlt évek folyamán az iskolánkban számos projektfeladatot megvalósítottunk. Voltak közöttük kötelező projektfeladatok, melyekben minden érintett diáknak részt kellett vennie. A kötelező projektek mellett szabadon választható projektfeladatok is szerepeltek; ezekben tetszésük szerint vehettek részt a diákok. A szabadon választható projektek közé tartoznak a SZAVFIT projektfeladatok.

*A szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektekben* (röviden SZAVFIT projektek) önkéntes alapon vehettek részt az iskolánk gimnazista tanulói. Ezek általában több évfolyamot is érintő projektfeladatok voltak. A többségük néhány hétig, vagy hónapig tartott, de volt közöttük olyan feladat is, amely több tanéven átívelt. A SZAVFIT projektek folyamán a tanulók csoportmunkában dolgoztak. Alapvetően olcsó eszközöket használtunk, amelyek minden iskolában megtalálhatók. A Rocard-jelentés két fontos megállapítása, hogy az iskolai kísérletek költségeit csökkenteni kell, és a tanulókat nagyobb mértékben be kell vonni különböző projektekbe [5]. A SZAVFIT projektfeladatokban ezek az elvek is érvényesültek.

A SZAVFIT projektfeladatokban a tanulóknak nem csak a fizikai ismeretei bővültek, hanem a természettudományos gondolkodásuk, problémalátó és problémamegoldó képességük is fejlődött. A projektmunka során a természettudományos kompetenciák mellett a szociális jellegű készségeik is fejlődtek. A diákoknak általában javult a természettudományos tantárgyakból a tanórai teljesítményük is; ezt a későbbiek folyamán részletesen bemutatom.

A feladatok során a tanulók a vezetésem mellett, részben önállóan dolgoztak, csoportos formában. Külön hangsúlyt helyeztem a tanulók fokozatos terhelésére, de a hagyományos tanórai keretekhez viszonyítva jóval oldottabb volt a projektfoglalkozások légköre. Az egymásra épülő projektfeladatok során a diákok megtanulták, hogyan lehet minőségi munkát végezni, külső kényszer nélkül. A közösen elvégzett, sikeres munka hozzájárult a tanulók belső motivációjának fejlődéséhez.

## SZAVFIT projektek jellemzői

A következő fejezetekben bemutatok néhány tanulói projektfeladatot, amelyeket az elmúlt évek során az iskolánkban valósítottunk meg. Mivel számtalan kisebb-nagyobb projektfeladatban vettek részt a tanulóink, ezért a terjedelmi korlátok miatt csak arra vállalkoztam, hogy a projektek közül szemezgessek. Az évek során megvalósított projektek közül sok feladatot más iskoláktól vettünk át, – természetesen ezekben is voltak módosítások – de ilyen projektekkkel az értekezésben nem foglalkozok.

A dolgozatban olyan *szabadon választható fizikai témájú természettudományos* (röviden SZAVFIT) projektfeladatokat mutatok be, amelyeket én találtam ki. Természetesen ezt nem úgy kell érteni, hogy mindent személy szerint egyedül csak én, de a projekteknek az alapötletei tőlem származnak. A legjobb tudomásom szerint, ilyen projektfeladatokat más középiskolákban eddig nem végeztek ilyen formában.

A bemutatásra kerülő projektekből az is közös, hogy alapvetően a fizika tantárgyhoz köthetőek, de emellett mindegyik projekt több természettudományos tantárgyhoz is kapcsolódik. Az összes projektfeladat tartalmaz olyan ismereteket, illetve fejleszt olyan képességeket és készségeket, amelyeket a tanulók nem csak egy tantárgyból hasznosíthatnak, hanem gyakorlatilag minden természettudományos tantárgyban.

Wojnarovich szerint az egyes tárgyak között az ismeretanyag, illetve annak belső logikája, egymásra épülő fogalom- és összefüggésrendszere tesz különbséget [42]. Személy szerint magam is a természettudományos tantárgyak külön diszciplináris szerkezetben történő tanítását támogatom. Emellett fontosnak tartom, hogy az egyes tudományterületek közötti kapcsolatokat, kapcsolódási pontokat is bemutassam a diákoknak; a dolgozatban ilyen értelemben használom az integrált szemléletű projekt kifejezést.

A hagyományos tanórai munkát színesíthetjük különféle projektfeladatokkal. A jól megtervezett projektmunka hatására a tanulók tantárgyi ismeretei gyarapodnak, és segít abban is, hogy a diákok motiváltabbak legyenek az adott szaktárgy tanulásában. A projektmódszert akár az alapórákon is alkalmazhatjuk, de az alapórákon inkább csak néhány kisebb, kedvcsináló projektfeladat megvalósítására jut idő. Véleményem szerint a projektfeladatokat elsősorban fakultáción, szakkörön, tehetséggondozó foglalkozásokon célszerű megvalósítani. Sokféle projektet kipróbáltunk; a személyes tapasztalataim alapján a tanulók munkavégzése a leghatékonyabb a tanári vezetés mellett végrehajtott páros, vagy csoportos projektfeladatok során volt.

A SZAVFIT projektekből a feladatokat legtöbbször délutánonként végeztük fizika szakkörön és tehetséggondozó foglalkozásokon. A projektek folyamán a kísérleteket, méréseket, szimulációkat csoportmunkában végeztük; a csoportokban 2-5 tanuló dolgozott együtt. A csoportokat a diákok alakították ki szabadon.

## **Modellezés**

A SZAVFIT projektekben résztvevő diákoknak bemutattam a modellek megalkotásának fázisait. Először áttekintettük a tanulókkal a modellezés folyamatának általános alaplépéseit, mivel korábban a többségük még nem készített tudományos modellt.

Woynarovich [43] szerint „*a modell a jelenség lényegét nem torzító közelítő leírás*”. Radnóti és mtsai szerint a modell valamely bonyolult valóságos rendszer egyszerűsített mása, melyben az eredeti rendszer fontos tulajdonságai megmaradnak [44]: „*a modell olyan gondolati struktúra, amellyel a természeti jelenségek egy jól körülhatárolt csoportját a tapasztalat segítségével úgy írjuk le, sokszor matematikailag, hogy minden a vizsgált probléma szempontjából lényegtelen hatást elhanyagolunk*”.

A modell segít abban, hogy jellemezzük a valós rendszer egy részét, kiemeljük annak bizonyos elemeit, a valós rendszerben lezajló jelenségeket leegyszerűsítsük. A modellben a vizsgált jelenségekkel kapcsolatos ismereteinket adjuk meg valamilyen formában; a modell megalkotásának folyamatát nevezzük modellezésnek.

Dr. Szabó Gábor professzor úr így fogalmazott [45]: „*a modellalkotásban az igazi művészet az, hogy el tudjuk választani a lényegest a lényegtelenről, és hogy a dolgok felszínén nyilvánvalóan megjelenő észlelések mögött meglássuk a valódi okokat. A modellnek ugyanis egyrészt a lehető legegyszerűbbnek kell lennie, mert különben kezelhetetlenné válik, másrészt, ha valamilyen lényeges tényezőt elhanyagolunk vagy lényegtelennek fontosnak vélünk, akkor hibás eredményre jutunk.*”

A modellek segítségével általában új, vagy részletesebb ismereteket szerezhethetünk egy jelenséggel kapcsolatban, előrejelzéseket tehetünk bizonyos folyamatok lezajlását illetően, szabályozhatjuk a rendszerünket, illetve korábbi feltevéseinket igazolhatjuk, vagy megcáfolhatjuk [46].

A dolgozatban konkrét példákon keresztül bemutatom, hogy a SZAVFIT projektekben résztvevő diákokkal hogyan dolgoztunk ki egy-egy modellt. A bemutatásra kerülő modelleket a tanulókkal az irányításom mellett fejlesztettük. Volt olyan modell, ahol a tanulók szabadon módosításokat is végrehajthattak a közösen kidolgozott alap modellen.

### **Az ismeretek bővítése**

A projektfeladatokban előkerülő ismeretek egy része szerepel a középiskolai tananyagban, de vannak benne olyan részek is, amelyek a fizika tananyagot hasznosan kiegészítik. A tapasztalataim alapján úgy látom, hogy a projektmunkával sikerült a tanulóink fizika szaktárgyi tudását jelentősen bővíteni. Emellett például a matematikai és az informatikai ismereteik is gyarapodtak, és a környezettudatos gondolkodásmódjuk is fejlődött.

A tapasztalataim szerint a tanulók jelentős része képes arra, hogy az oldottabb légkörű projektmunkában olyan teljesítményt nyújtson, amely a saját korábbi teljesítményszintjét nagymértékben meghaladja; a diákok akár az életkorukat meghaladó feladatokat is képesek megoldani.

A bemutatásra kerülő projektfeladatok közös jellemzője, hogy a projektekhez nem használtunk fel külön anyagi forrásokat, magyaráz ezek ingyenesen kivitelezhető projektfeladatok voltak. Magától értetődik, hogy használtuk az iskolánk erőforrásait (mérőműszerek, számítógépek, tantermek, stb.), de ezen kívül nem vettünk igénybe mást. Ez bátorítást nyújthat a projektmódszer alkalmazásában kevésbé járatos pedagógus kollégáknak, hogy az ingyenes projektfeladatokkal is bővíthetjük a tanulóink ismereteit, fejleszthetjük a képességeiket, készségeiket.

Egy projektfeladat során rengeteg problémát kell a résztvevőknek megoldani. Az összes projekt altéma kifejtésére, illetve az összes részlet ismertetésére nem vállalkoztam a terjedelmi korlátok miatt. A célom az volt, hogy a dolgozatban az általam kitalált tanulói projektfeladatokról egy átfogó képet nyújtsak úgy, hogy közben néhány fontosabb részletet is bemutatok.

### **Célkitűzések**

A kutatásaim célja a természettudományos oktatásban alkalmazható projektek kidolgozása és jellemzőinek vizsgálata volt, – az iskolai oktatásban eddig nem, vagy csak részben tárgyalt témákon keresztül – valamint a kidolgozott módszer tapasztalatainak bemutatása volt.

A dolgozatban célom volt, hogy bemutassam, az általam kidolgozott iskolai projektekből hogyan használtam ki az érdeklődésen alapuló oktatási módszerek lehetőségeit, aminek következtében sikerült a diákokat sokféle tudományos tevékenységbe bevonnom a csoportos munkavégzés során. A disszertációban a következő célokat tűztem ki:

- A céljaim között szerepelt, hogy bemutassam a projektnek, mint módszernek a legfontosabb jellemzőit. Ennek érdekében a dolgozatban a projektmódszer pedagógiai értelmezését vizsgáltam, az iskolai környezetre, a természettudományos tantárgyakra és ezen belül a fizika tantárgyra összpontosítottam a figyelmemet.
- Célul tűztem ki, hogy tanulói mérések alapján meghatározzuk egy átlagos háztartás energiafogyasztását; illetve a mérési eredmények alapján egy olyan számítógépes programot készítsünk, amely egy átlagos háztartás egyszerűsített energetikai leírására szolgál.
- Célom volt, hogy a gimnazista diákokkal együttműködve megalkossak egy számítógépes programot a fázisátalakulás-szerű jelenségek iskolai bemutatására. A programban színváltó kaméleonok segítségével vizsgálhatjuk a fázisátalakulás folyamatát. A fázisátalakulás bemutatására számos program létezik; a célom az volt, hogy olyan számítógépes programot készítsünk, amely a fázisátalakulást játékos környezetben mutatja be. A tanulókkal közösen megírt játékos program a középiskolás gyerekek fantáziáját megmozgatja, segíti a tanulókat a fázisátalakulás fogalmának megértésében.

- Céлом volt, hogy a tanulókkal meghatározzam, a Rijke-cső paraméterei hogyan befolyásolják az instabilitás kialakulását a rendszerben. Célul tűztem ki, hogy a vizsgálatainkban választ keressünk erre, és azt kísérleti adatokkal alátámasszuk, a megfigyelt jelenségekre középiskolai szintem megérthető magyarázatot adjak.
- A céljaim közé tartozott, hogy megvizsgáljam a természettudományos projektmunka diákokra gyakorolt hatásait. Céлом volt, hogy megmutassam, pedagógiai szempontból is van értelme és haszna a tanulókkal közösen megvalósított projekteknek.
- Céljaim között szerepelt, hogy megvizsgáljam a projektmunka szerepét a tanulók tantárgyi attitűdjének formálásában. Több évig tartó kérdőíves vizsgálatokban arra kerestem választ, hogy az iskolánk tanulói hogyan viszonyulnak a projektmunkához, illetve a végrehajtott projektfeladatok hogyan befolyásolják a diákok természettudományos tantárgyakkal kapcsolatos beállítódását.

A dolgozat további fejezeteiben bemutatom, hogy a kitűzött célokat hogyan sikerült megvalósítani.

#### **4. Közlekedéshez kapcsolódó projektfeladat**

Megvalósítottunk egy projektfeladatot, melynek legfőbb célja az volt, hogy a tanulók járművekkel kapcsolatos tudását gyarapítsuk. A projektben a 9-ik, a 10-ik és a 11-ik évfolyamos tanulók vettek részt.

##### **Jármű a fizika órán**

A gépjármű, mint közlekedési eszköz, vagy mint technikai rendszer többször szóba kerül fizikából. Általános iskolában tananyag a belsőégésű motorok: kétütemű, négyütemű, benzin és dízelmotor, amelyek a leggyakrabban alkalmazott erőforrások a gépjárművekben. A gépjármű kerekeinek meghajtása kiváló példa arra, hogy megbeszéljük a különbséget a hajtott, illetve nem hajtott kerekek viselkedésében [47, 48].

A gépjárművekhez kapcsolódik számos olyan technikai újdonság (újítás), amelyeket az új kerettanterv szerint (is) lényeges, hogy ismerjenek a diákok: pl. hőerőgépek működése, biztonsági öv szerepe, kerekek tisztán gördülése; de a GPS, navigáció, blokkolás-gátló, kipörgés-gátló, stb. is olyan fogalmak, amelyek ma már a mindennapok fizikájának részét képezik [48].

A gépjárművek meghajtásában olyan fogalmakkal találkozhatunk, mint a hibrid technológia, vagy a hidrogén-hajtás. Láthatjuk, hogy a gépjármű kimeríthetetlen tárháza a fizikai ismereteknek, és a számítási példákban is gyakran szerepelnek ilyen témájú feladatok [47 - 49]. Személyes tapasztalatom azt mutatja, hogy a különböző gépjárművekhez kapcsolódó feladatokhoz a legtöbb tanuló szívesen hozzászól; mindenkinek van valamilyen ezzel kapcsolatos véleménye, ötlete, tapasztalata, élménye.

## **A projekt indulása**

A projekt egy beszélgetés folyamánként indult. A diákok egy részét nagyon érdekelték a gépkocsik és a motorkerékpárok, illetve az üzemanyagárak alakulása. Mivel sokakat érdekelt a téma, ezért kihasználva a jó alkalmat, arra biztattam őket, hogy akár tudományos szempontból is megvizsgálhatnánk a kérdést.

A projektmódszer alkalmazása kézenfekvőnek tűnt, hiszen így sokkal oldottabb körülmények között lehet egy témát feldolgozni [B3]. A projekt elején látható volt, hogy a témát több oldalról is érdemes körüljárni, ezért egy komplex projektfeladatot indítottam.

## **A projekt célkitűzései**

A projektünk fő célja az volt, hogy megvizsgáljuk a jelenleg használt, illetve a jövőben használható járművek főbb jellemzőit. A projektünk altémái:

- Mikor jelentek meg a gépjárművek?
- Milyen üzemanyagokat használhatunk a gépjárművekben?
- Milyen elven épüljenek fel a jövőben használatos gépjárművek?
- Milyen hajtásrendszer biztosítsa a jármű mozgását?
- Hogyan közlekedjünk a járművel?
- Hogyan határozzuk meg a jármű sebességét?

A projektben mind a 6 részfeladatot megoldottuk. Először megnéztük, hogyan jelentek meg és terjedtek el a gépjárművek a közlekedésben. A projekt következő szakaszában a tanulókkal áttekintettük az újabb fejlesztésű gépjármű típusokat, természetesen a teljesség igénye nélkül. Ennél a feladatnál a diákoknak be kellett mutatni az adott típus jellemzőit, technikai paramétereit, illetve érvelniük kellett az adott típus mellett, vagy ellen. Főleg az interneten, illetve prospektusokban keresgéltek az adatokat.

A projektben ezek után az üzemanyag típusokat és a meghajtási módokat vizsgáltuk. A gépjárművek által kibocsátott szennyező anyagok nagyon jelentős mértékben felelősek a környezetszennyezésért. A motorizált közlekedés volumenének egyre növekvő üteme miatt szükség szerű, hogy a meglévő nyersanyagkészleteket ésszerűbben, takarékosabban használjuk fel, azaz csökkenteni kell az egyes gépjárművek fogyasztását, másrésztől új üzemanyagok kifejlesztésén is gondolkodnunk kell [49].

A projektben végigvettük a gépjárművek meghajtásának lehetőségeit, nevezetesen milyen elven működjön a gépjármű motorja, milyen legyen az erőforrás? Mindegyik erőforrás típushoz kerestünk érveket és ellenérveket is. A projekt résztémáit korábban már bemutattam folyóirat cikkekben [B3, B4, B5]. A dolgozatban csak az utolsó alprojekt néhány részletét mutatom be, terjedelmi korlátok miatt.



## **Kerékpár mozgási jellemzőinek meghatározása**

A tanév végén, a 9. évfolyamos tanulóknak egy kerékpáros sebességét és gyorsulását kellett projekt munkában megmérni [B6]. Kicsit részletesebben: egy kerékpáros álló helyzetből indulva felgyorsít, majd amikor elérte az utazó sebességét, akkor azzal nagyjából egyenletesen halad egy darabig, végül lefékez és megáll. Határozzuk meg mérés segítségével a kerékpáros sebességét az idő függvényében, illetve határozzuk meg a kerékpáros gyorsulását az idő függvényében!

Ehhez hasonló számításokat végeztünk a tanév folyamán, de akkor csak számoltunk. Most viszont mérnünk kellett. Ez a projekt feladat jó lehetőséget biztosított arra, hogy a tanév végén az egyenes vonalú mozgások témakört átismételjük és kiegészítsük, illetve, hogy a méréseket is gyakoroljuk. A mérések többségét az iskola sportudvarán végeztük. A tanulók nagyon örültek annak, hogy kiszakadhattak a normál tanórák megszokott ritmusából.

A tanulók első ötlete az volt, hogy kérjünk kölcsön egy ún. szuper traffipaxot. Mivel ilyen készüléket nem tudtunk szerezni, ezért ezzel a módszerrel nem foglalkozok. Ezután már kicsit pontosabban határoztam meg a feladatot: saját magunknak kell elvégezni a méréseket, és csak olyan eszközöket használhatunk, amelyek az iskolában, vagy otthon rendelkezésünkre állnak. Tehát nem veszünk semmilyen új eszközt, a meglévő eszközeinkkel kell meghatároznunk a kerékpáros sebességét és gyorsulását.

Kiválasztottunk néhány jelentkező tanulót, akik kerékpárral közlekedtek, és a kerékpározó tanulók mozgásának jellemzőit kívántuk különböző módszerekkel meghatározni. A mérések során úgy jártunk el, hogy a kerékpározó tanulók hátizsákjaiba helyeztünk különböző okosmobilokat is. (Ennek szerepére később visszatérek.)

A tanulók feladata az volt, hogy az aszfaltpálya alapvonaláról (startvonalról) elindulva a kerékpárjukkal próbáljanak meg nagyjából egyenletesen felgyorsítani egy közepesen nagy sebességre, ezzel haladjanak egyenletesen, ameddig csak tudnak, majd az aszfaltpálya túlsó oldalán fékezzenek le biztonságosan, ha lehet, nagyjából egyenletesen.

Több mérést végeztünk, különböző módszereket próbáltunk ki. Természetesen az újabb és újabb kerékpározások alkalmával másként tekertek a diákok. Volt olyan, amikor kb. 6 másodperc alatt végigtekert valamelyik diák a pályán, másik alkalommal akár 12 másodperbe is beletelt, mire végigért. A mérések közül kiválasztottam egy esetet, amelyben a kerékpározó tanulónak sikerült a kitzűzött feladatot jól végrehajtani; azaz az elején elég egyenletesen gyorsított, utána majdnem egyenletes sebességgel haladt, a végén pedig majdnem egyenletesen lassított. (A dolgozatban az első három mérésnél ezt az esetet mutatom be; tehát az első három módszernél mindegyik leírás ugyanarra az egy konkrét mozgásra vonatkozik.)

### **Stopperórás módszer**

Az első módszer lényege, hogy az aszfaltpálya szélén az oldalonál 1 méterenként felsorakoztak a tanulók, mindegyiknél volt egy-egy stopper, vagy mobiltelefonnal mérték az eltelt időt.

Az aszfaltozott pálya hossza 40 méter volt, és mindkét végén volt még 2,5 méter üres rész; ez az induláshoz és a biztonságos megálláshoz kellett. Lényeges volt, hogy a pályán pontosan 40 métert kellett megtenni a kerékpárosnak.

A pálya szélén a méterenként felsorakozott tanulók a vizuális startjelre indították a stopperjukat – hogy a hang terjedéséből adódó késéseket kiküszöböljük – és amikor a kerékpár első kereke pontosan egy vonalba került velük, akkor állították le a stopperjukat. Ezután az adatokat feljegyeztük. A 4.1. ábrán az oldalvonal mentén felsorakozott tanulók láthatók a mérés végrehajtása közben.

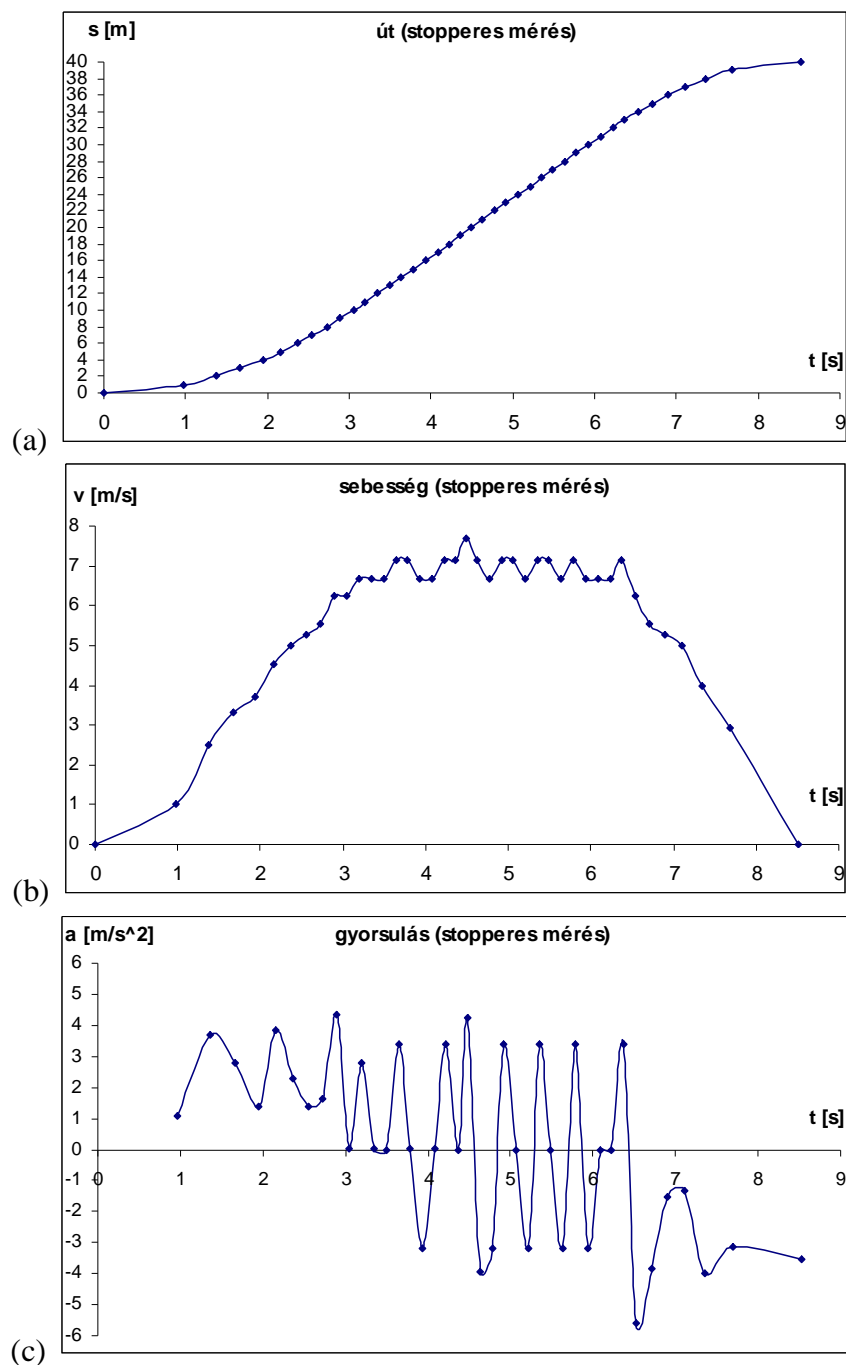


**4.1. ábra** A tanulók stopperrel mérnek.

Táblázatkezelő programba beírtuk a tanulók által mért adatokat. Az összetartozó időpontokat és a megtett utakat könnyedén ábrázolni tudtuk. A 4.2.a ábrán a kerékpáros által megtett távolságok láthatók az eltelt idő függvényében. (Valójában a megtett utakhoz tartozó időket mértük, de a könnyebb értelmezés kedvéért a vízszintes tengelyen ábrázoltuk az időt, a függőleges tengelyen az utakat.)

Az út-idő grafikon menete nagyjából olyan, mint amire előzetesen is számítottunk: az elején egy emelkedő parabolaívhez hasonló görbe, majd egy nagyjából egyenes szakasz, végezetül egy csökkenő parabolyszerű ívszakasz.

Ezután az egyes szakaszokhoz tartozó átlagsebességeket (szakaszsebességeket) számítottuk ki: a megtett szakaszok hosszát (minden esetben 1 m volt) elosztottuk a szakasz megtételéhez szükséges idővel. A 4.2.b ábrán az egyes szakaszokhoz tartozó átlagsebességeket ábrázoltuk az eltelt idő függvényében.



**4.2. ábra** A mozgás jellemzői a stopperórás mérés alapján: (a) megtett út az idő függvényében; (b) sebesség az idő függvényében; (c) gyorsulás az idő függvényében.

Az ábrán azt láthatjuk, hogy a kerékpáros sebessége kezdetben folyamatosan növekszik kb. 3,25 másodpercig, nagyjából egyenletes ütemben. Ezután a kerékpáros sebessége közelítőleg állandó értékű marad nagyjából 3 másodpercen keresztül (kb. 6,3 másodpercig). Ebben a középső részben a kerékpáros szakaszsebességei 6,67 m/s és 7,14 m/s között voltak. A középső részre kiszámítottuk a szakaszsebességek átlagait, ez 6,95 m/s értékű volt. A mozgás utolsó részében a kerékpáros fékez, ekkor a sebessége fokozatosan csökken, nagyjából egyenletes ütemben. A folyamat végén a kerékpáros megállt 8,52 másodpercnél. A kapott ábra nagyjából megfelelt az előzetes várakozásainknak.

Ezután kiszámítottuk az egyes szakaszokhoz tartozó gyorsulások értékeit. Ezt láthatjuk a 4.2.c ábrán. A kapott ábra első ránézésre elég furcsa, nem ilyenre számítottunk. Azt vártuk, hogy az elején lesz egy pozitív értékű gyorsulás, majd a középső résznél a gyorsulás szinte zérus lesz, végül a harmadik résznél egy negatív gyorsulást kapunk.

Ha alaposabban szemügyre vesszük a grafikont, akkor észrevehetjük, hogy a mozgás első részében (a mozgás kezdetétől kb. 3,25 másodpercig) pozitív értékű gyorsulásokat kaptunk az egyes szakaszoknál. Ez volt az a rész, amikor a kerékpáros fokozatosan próbálta növelni a sebességét. Kiszámoltuk erre a részre a gyorsulások átlagát, ez  $2,28 \text{ m/s}^2$  volt. A mozgás középső részében (kb. 3,25 másodperctől kb. 6,3 másodpercig) az egyes szakaszokhoz tartozó gyorsulások között vegyesen pozitív és negatív értékek is vannak, mivel néhol növekedett, néhol csökkent a sebesség. Ezen a részen a gyorsulások átlaga  $0,22 \text{ m/s}^2$ . A mozgás utolsó részében (kb. 6,3 másodperctől a mozgás végéig) a gyorsulások negatív értékűek, a kerékpáros sebessége folyamatosan csökkent, a végén megállt; itt a gyorsulások átlaga  $-3,28 \text{ m/s}^2$ .

Az út-idő és a sebesség-idő grafikonok tehát nagyjából megfeleltek az előzetes várakozásainknak, de a gyorsulás-idő grafikon nem. A tanulókkal elgondolkoztunk azon, hogy mi lehet az oka annak, hogy nem úgy jöttek ki a gyorsulások, mint ahogyan vártuk. Egyfelől a valós mérések mindig hibával terheltek. 41 diák esetén értelemszerűen különbözőek a reakcióidők, vagy, hogy a kerékpár első kerekét hogyan nézték, stb. A sebességet az elmozdulás idő szerinti differencia-hányadosaként, a gyorsulást a sebesség idő szerinti differencia-hányadosaként kaptuk, azaz a mérési hibák fokozottan számítanak a gyorsulás kiszámításánál.

Hogyan javíthatnánk a mérés pontosságán? Ha mondjuk, sűrűbben helyeznénk el a stopperekkel mérő embereket (pl. félméterenként), akkor valószínűleg pontosabb eredményeket kaphatnánk (de ehhez nem volt elegendő számú diák).

### **Videofelvételes módszer**

A következő ötletünk az volt, hogy vegyünk fel videokamerával a kerékpáros mozgását, majd a videót utólag elemezzük ki, és így határozzuk meg a sebességeket és a gyorsulásokat.

Léteznek olyan számítógépes programok, amelyek segítségével egy videofelvételen látható mozgást elemezhetünk (pl. VideoPoint, Webcam Laboratory). Ha kijelölünk valamilyen viszonyítási pontokat a képen és megadjuk ezek távolságát, akkor a program ki tudja számolni a mozgó test által megtett távolságokat, sebességeket, gyorsulásokat; ezeket grafikus formában ábrázolni is lehet [50]. Sajnos ezek a programok általában nem ingyenesek. Ha valamelyik iskolában van ilyen program, akkor ott jól használható a hasonló típusú feladatokra, a fáradságos számításokat elvégzi a program helyettünk. A kerékpáros alprojektben viszont mindent mi magunk számolgattunk ki. Ennek több oka is volt: egyrészt az iskolánkban nem volt ilyen program; másrészt a projekt indulásakor elhatároztam, hogy mindent mi magunk oldunk meg ingyenesen rendelkezésre álló eszközökkel, nem veszünk igénybe olyan eszközt, amiért fizetni kellene; harmadrészt külön célom volt, hogy gyakoroljuk az ilyen típusú számításokat.

A videofelvételek elemzése úgy történt, hogy a tanulók ingyenes képszerkesztő programmal képkockákra bontották a videót. A videofelvétel tulajdonképpen állóképek sorozatából áll, csak nagyon rövid időközönként (néhány század másodpercenként) követik egymást a képkockák.

A program mindegyik képkockához hozzárendel egy-egy időkódot, ez alapján a mozgás jellemzőit már kiszámíthatjuk, ha ismerjük az egyes időpontok közötti elmozdulásokat. A legegyszerűbb esetben a videofelvételen jelölünk ki ismert viszonyítási pontokat, és ezekhez képest határozhatjuk meg az egyes elmozdulások értékeit.

Ezzel a módszerrel képkockáról-képkockára haladva kiszámíthatjuk a pillanatnyi szakaszsebességeket; ha a sebességek változnak, akkor a pillanatnyi gyorsulásokat. Értelemszerűen minél rövidebb időközönként tudunk mintát venni a képkockákról (ez a kamerától függ), és minél pontosabban tudjuk meghatározni az elmozdulások nagyságait, annál pontosabban tudjuk kiszámítani a sebességeket, illetve a gyorsulásokat.

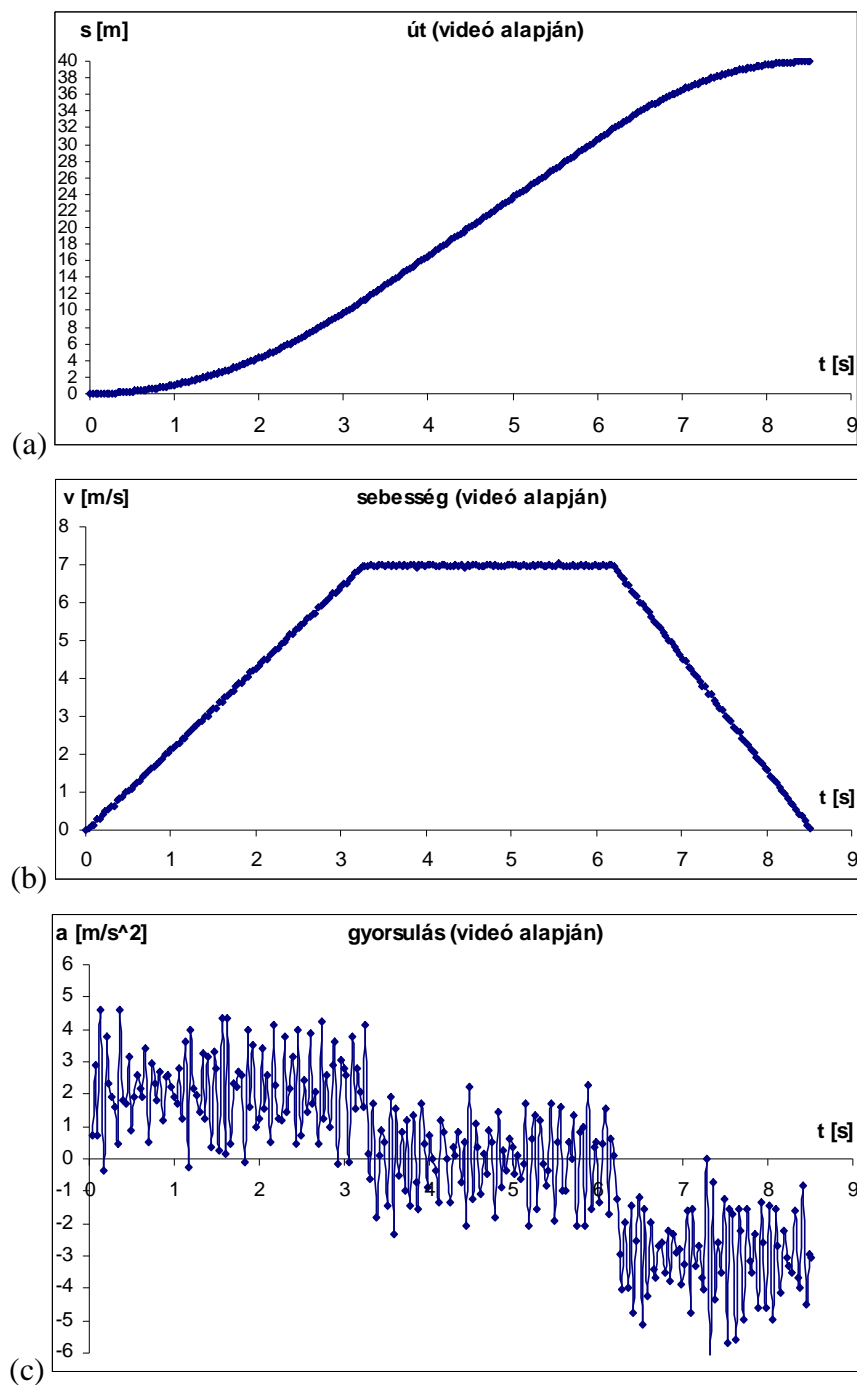
A videofelvételes módszernél először a kamerát a sportpálya szemközti oldalvonalán helyeztük el és onnan készítettük a videofelvételt, de a távolságok becslésével nem voltunk teljesen megelégedve. Ezért a videós módszert továbbfejlesztettük.

A kerékpár kormányához egy mobiltelefont szereltünk, melynek kameráját lefelé irányítottunk. A távolságok pontosabb meghatározásához az aszfaltra 5 centiméterenként krétával jeleket rajzoltunk. A mobiltelefon kamerája másodpercenként 30 képkockát rögzített. A videofelvétel alapján 1/30 másodpercenként meghatároztuk (megbecsültük) a krétajelek alapján kerékpár elmozdulásait.

Az adatokat beírtuk a táblázatkezelő programba, kiszámoltuk az egyes időszakokhoz tartozó átlagos sebességeket és gyorsulásokat. A 4.3. ábrán az út-idő, a sebesség-idő és a gyorsulás-idő grafikonok láthatók. (Az ábrán ugyanannak a kerékpárnak a mozgása látható, mint az előző feladatban, csak most a videofelvétel alapján számoltunk.)

A sebesség-idő grafikonon a mozgás első részében sokkal egyenletesebben növekszik a kerékpáros sebessége, a középső résznél szinte állandó sebességgel halad, majd az utolsó résznél gyakorlatilag egyenletesen csökkenti a sebességét. A középső szakaszon a kerékpáros átlagsebessége 6,98 m/s a videofelvétel adatai alapján.

A gyorsulás-idő grafikonon is láthatunk valamekkora változást. A mozgás első szakaszában végig pozitív gyorsulásokat kaptunk, melyek átlaga  $2,15 \text{ m/s}^2$ ; a középső szakaszon még mindig vegyesen láthatunk pozitív és negatív gyorsulásokat is, ezek átlaga  $0,01 \text{ m/s}^2$ ; a fékezési szakaszon a gyorsulások végig negatív értékűek, az átlaguk  $-2,98 \text{ m/s}^2$ . Természetesen most is vannak ingadozások az egyes szakaszok gyorsulásainak értékeiben, de kisebbek, mint a stopperórás mérések esetében.



**4.3. ábra** A mozgás jellemzői a videofelvétel alapján: (a) megtett út az idő függvényében; (b) sebesség az idő függvényében; (c) gyorsulás az idő függvényében.

A különböző mérősorozatok összehasonlítása helyett azt vizsgáltuk, hogy egy adott kerékpáros tekerés esetén a különböző módszerek milyen eredményt adnak. Mivel a kerékpár változó mozgást végzett, ezért az egyszerűség kedvéért a mozgás középső szakaszához tartozó sebességeket hasonlítottuk össze. A stopperes tanulói mérések alapján a középső szakaszon a kerékpár átlagsebessége 6,95 m/s, a szórás 0,29 m/s; a videofelvétel alapján a kerékpár átlagsebessége 6,98 m/s, a szórás 0,12 m/s. Az igazsághoz tartozik, hogy ez a konkrét mérés nagyon jól sikerült. A legtöbb esetben sokkal nagyobb eltérések voltak a stopperrel mért és a videó alapján számított sebességek között.

A mérésorozat kezdetén jóval nagyobbak voltak az eltérések, mert a tanulók még nem jöttek bele a mérésbe. A mérésorozat végén is nagyobbak voltak az eltérések, mert valószínűleg már fáradtabbak, figyelmetlenebbek voltak a tanulók.

### **Idealizált mozgás vizsgálata**

A videó elemzése alapján azt láttuk, hogy a kerékpáros mozgása tényleg 3 szakaszra bontható: álló helyzetből indulva 3,25 másodpercig majdnem egyenletesen gyorsít, ezután 3,25 s és 6,20 s között közelítőleg egyenletesen halad, majd 6,20 s és 8,52 s között nagyjából egyenletesen lassít, végül megáll.

A valódi mozgás során természetesen nem állandó az első szakaszon a kerékpáros gyorsulása, a középső szakaszon nem állandó a sebessége és a fékezésnél sem állandó a lassulása, de most ezt elhanyagoljuk, és idealizáljuk (leegyszerűsítjük) a test mozgását.

Mekkora a középső szakaszon a kerékpáros sebessége? Egyfelől az idealizált mozgás alapján ezt ki lehet számítani, másfelől a videó alapján meghatározhatjuk, majd a két eredményt összehasonlíthatjuk.

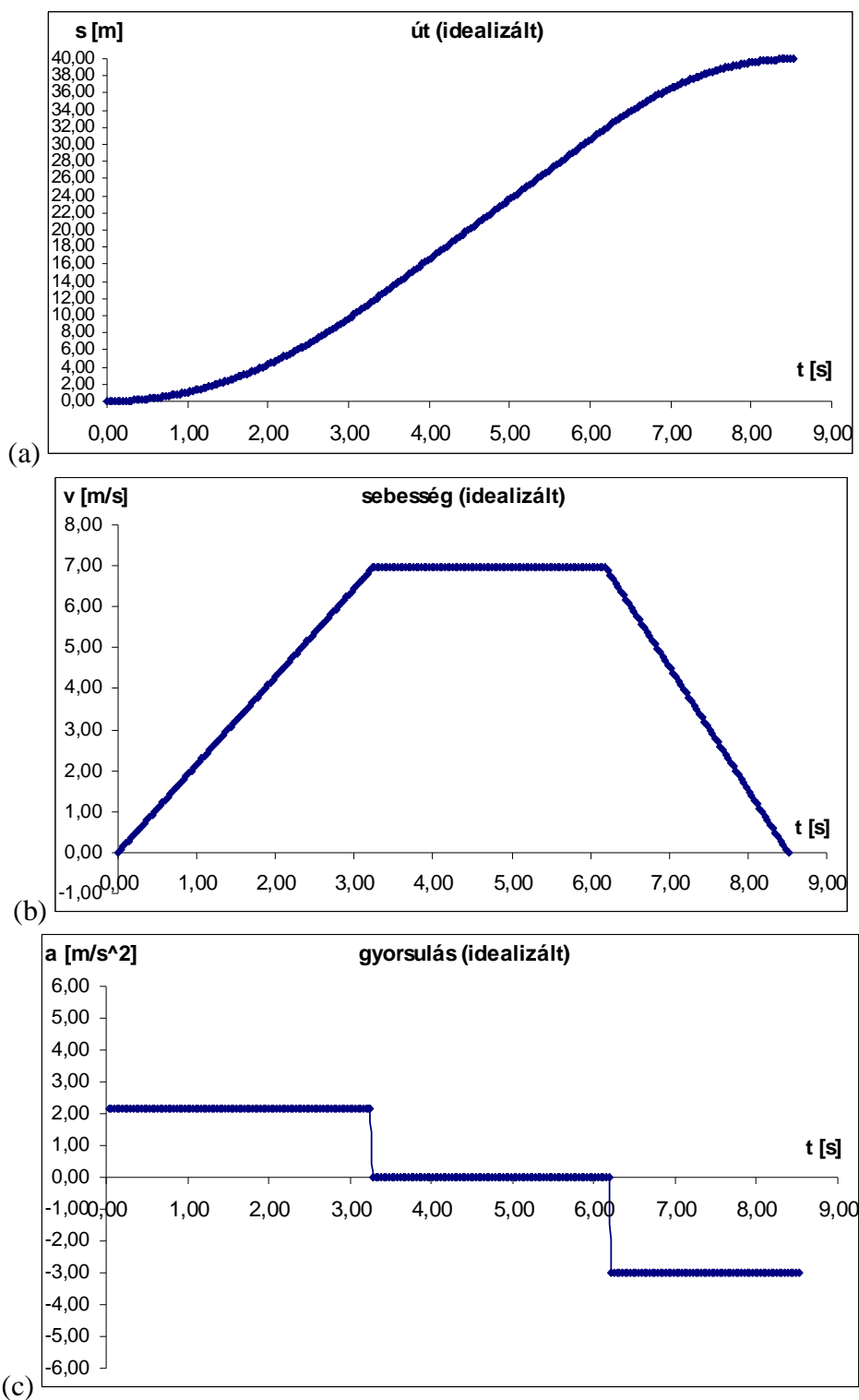
Nézzük először az idealizált számítást! A mozgás első szakasza  $\Delta t_1=3,25$  s-ig tartott; a megtett út  $s_1=0,5 \cdot v_k \cdot \Delta t_1$ , ahol  $v_k$ -val jelöljük a kerékpáros sebességét a középső szakaszon. A mozgás második szakasza  $\Delta t_2=2,95$  s-ig tartott; a megtett út  $s_2=v_k \cdot \Delta t_2$ . A fékezési szakasz  $\Delta t_3=2,32$  s-ig tartott; a megtett út  $s_3=0,5 \cdot v_k \cdot \Delta t_3$ .

A teljes út  $s_{\text{össz}}=s_1+s_2+s_3=40$  m; a számításokból azt kaptuk, hogy a középső szakaszon  $v_k=6,98$  m/s sebességgel haladt a kerékpár. Az első szakaszon a kerékpáros gyorsulása  $a_1=\Delta v_1/\Delta t_1=2,15$  m/s<sup>2</sup>; a fékezési szakaszon a gyorsulása  $a_3=\Delta v_3/\Delta t_3=-3,01$  m/s<sup>2</sup>.

A videó képeinek elemzése szerint a középső útszakasz hossza  $s_2'=20,59$  m, a középső szakaszhoz tartozó idő  $t_2=2,95$  s. Ez alapján a középső szakaszon a kerékpáros átlagsebessége  $v_k'=6,98$  m/s. Láthatjuk, hogy az idealizált számítás és a videofelvétel elemzéséből a középső szakaszon azonos átlagsebességek jöttek ki. Ez azt jelenti, hogy igazából nem vétünk nagy hibát, ha ennél a konkrét esetenél a tanórai idealizált mozgással számolunk.

Bizonyos szempontból jobb is, ha a normál tanórán az idealizált mozgással foglalkozunk, mert a valódi mozgások elég bonyolultak. A projektfeladatban a mérésekkel viszont az volt a célom, hogy valódi mozgásokkal kapcsolatban végezzünk tényleges méréseket. A valóságban a mérés nem olyan egyszerű, mint az idealizált világban.

A 4.4. ábrán az idealizált mozgás út-idő, sebesség-idő és gyorsulás-idő grafikonjai láthatók. (Az ábrán ugyanannak a kerékpárnak a mozgása látható, mint az előző feladatokban, csak most úgy számoltunk, hogy a gyorsítási szakaszon állandónak gondoltuk a gyorsulást, a középső szakaszon állandónak gondoltuk a sebességet, és a fékezési szakaszon állandónak gondoltuk a lassulást.)



**4.4. ábra** Az idealizált mozgás jellemzői: (a) megtett út az idő függvényében; (b) sebesség az idő függvényében; (c) gyorsulás az idő függvényében.

### Kerékpár-computeres mérés

A tanulók következő ötlete az volt, hogy szereljünk a kerékpárra egy sebességmérő computert. Ez egy olyan sebességmérő eszköz, amely a kerék elfordulását méri, így határozza meg a kerék elmozdulását, illetve méri a mozgás idejét, és az elektronikus eszköz automatikusan kiszámítja a kerékpár sebességét.



Feltételeztük, hogy a kerekek nem csúsznak meg a száraz aszfalton, azaz a kerékpár kerekei végig tisztán gördülnek.

Az eszközön elsőként be kellett állítanunk a kerék átmérőjét. Az eszköz úgy működik, hogy egy kis mágneset kell az egyik küllőre szerelni, a kerék forgásakor a mágnes elhalad egy érzékelő előtt, amiben feszültséget indukál, majd ez a jel egy központi adatfeldolgozó egységbe kerül, ami tulajdonképpen egy célszámítógép; ez számítja ki a megtett távolságot. Az eszköz méri az eltelt időt, majd meghatározza az átlagsebességet, az aktuális (pillanatnyi) sebességet, és a memóriájában elraktározza a maximális sebességet is.

Kipróbáltunk több ilyen eszközt. Az átlagsebességet nagyjából helyesen mutatták, ha a teljes 40 méteres utat nézzük. Néhány méteres útszakaszokon viszont nem lehetett velük érdemi méréseket végezni. Ezen nem kell csodálkoznunk, hiszen pl. a 0,64 m átmérőjű kerék kerülete 2,01 méter, azaz ekkora távolságok megtétele után van egy-egy elektromágneses jeladás. Ez nagyjából annak felelt volna meg, ha a tanulók 2 méterenként sorakoztak volna fel az aszfaltpálya oldalvonalánál és stopperrel mérték volna az időt. (A kerékpár-computer időmérése valószínűleg pontosabb, mint a tanulóké.) A legnagyobb gondot az jelentette, hogy a kerékpár-computer adatait nem tudtuk a táblázatkezelő programba importálni, így az adatokkal nem tudtunk utólag műveletek végezni, pl. nem tudtuk a gyorsulásokat meghatározni.

### **Okostelefonos mérés**

A következő tanulói ötlet az volt, hogy okostelefonnal határozzuk meg a sebességeket és gyorsulásokat. Az okostelefonokba beépített gyorsulásmérő szenzorokat használhatjuk a mozgó test (a telefon) gyorsulásának meghatározására [51]. A kerékpározó tanuló hátizsákjába betettünk több különböző okostelefont, tehát ezek a mobiltelefonok együtt mozogtak a kerékpárral. Arra gondoltunk, hogy a mozgás végén csak kivesszük a hátizsákból őket, majd megnézzük, hogy mit mutatnak.

Az okostelefonokban egy ún. többtengelyű gyorsulásmérő szenzor (accelerometer) van beépítve [51]. Azért szerelnek ilyen szenzorokat a készülékekbe, hogy azok érzékeln tudják a különböző mozgásokat. Például a telefon elforgatásakor automatikusan változik a képernyő tájolási módja a fekvő és az álló képmegjelenítés között. Egy másik alkalmazási terület, amikor bizonyos okostelefonos játékoknál (pl. autóverseny, motorverseny) a készülék jobbra vagy balra fordításával, döntésével lehet kormányozni a járművet a virtuális versenypályán.

Az okosmobilhoz letölthetünk olyan ingyenes alkalmazást, amellyel a készülék gyorsulásmérő szenzorainak adatait elemezhetjük: pl. Sensor Kinetics alkalmazás az Android operációs rendszert használó telefonokhoz. A Sensor Kinetics alkalmazás segítségével a telefon pillanatnyi gyorsulásait megjeleníthetjük a kijelzőn [51]. A három tengely ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  tengelyek) irányában mért gyorsulásokat három különböző grafikonon ábrázolja.

Először az okostelefonokat a kerékpáros hátizsákjába helyeztük, de a tekerés közben a tanulónak mozgott az egész teste, ezért mindhárom tengely mentén voltak gyorsulások. Ezután a kerékpár kormányához szereltünk egy telefontartót vízszintes helyzetbe, és ide helyeztük az okosmobilt. Arra számítottunk, hogy a vízszintes aszfaltpályán egyenes vonalban mozgó kerékpáros és a megfelelő irányba állított telefon esetén már csak az egyik tengely mentén mérünk jelentősebb gyorsulásokat, a másik két tengelynél sokkal kisebb gyorsulásokat kapunk. Ez csak részben volt igaz. Az egyik tengely mentén tényleg nagyobb abszolút értékű gyorsulásokat kaptunk, de a másik két tengely mentén is voltak gyorsulások. Ezek a gyorsulások részben a pálya egyenetlenségeiből és kerékpár oldalirányú billegéséből származtak. A telefon (és a benne lévő szenzor) pozíciójának változtatásával is próbálkoztunk.

Általánosságban elmondhatjuk, hogy az okosmobilokkal végzett mérések sok lehetőséget kínálnak a fizikaórákon. A telefonba épített különböző szenzorokat sokrétűen kihasználhatjuk: megbeszélhetjük a működési elvüket, konkrét méréseket végezhetünk velük, illetve összehasonlíthatjuk a különböző készülékekben lévő szenzorok mérési adatait egymással [51].

Ha megfelelő (ingyenes) alkalmazást találunk, akkor az okostelefon felhasználása általában egyszerű, és a tanulók is szívesen foglalkoznak vele a tapasztalatok szerint. Az okostelefon tehát jó kiegészítő eszköz lehet a fizika tanításában, tanulásában [51].

### **GPS módszer**

Egy újabb módszer volt a GPS (Global Positioning System = Globális Helymeghatározó Rendszer) alapján történő mérés. Ez a rendszer a Föld körül keringő navigációs műholdaktól való távolságok alapján határozza meg a vevőkészülék helyzetét [49]. A kerékpárra GPS navigációs eszközöket szereltünk. (A hagyományos GPS készülékek mellett az okostelefonok többségében is van beépített navigációs rendszer.)

Néhányan hoztak olyan sportórát, amelyekbe GPS-t is beépítettek, ezeket is kipróbáltuk. Ez egy jó lehetőség volt arra, hogy a GPS működéséről kicsit többet megtudjanak a diákok. A GPS módszer csak olyan helyen alkalmazható, ahol a navigációs műholdak jeleit venni lehet. A GPS módszer sem mindig felelt meg a tanulók előzetes várakozásainak. Talán pontosabb lenne úgy fogalmaznom, hogy a különböző készülékek különböző pontossággal mérték ugyanazt a mozgást.

A sebességek meghatározásában a hagyományos GPS-es navigációs eszközök egy része még a kerékpár-computernél is pontatlanabban mért. Ennek oka valószínűleg az lehet, hogy a kisebb távolság miatt ezek a készülékek nem tudták a megtett utat pontosan meghatározni. (Esetleg az is előfordulhatott, hogy az udvaron végzett méréseknél az iskola épületei néha leárnyékolták valamelyik műhold jelét a kerékpár mozgásakor.)

Közúti közlekedés esetén a GPS segítségével kényelmesen és viszonylag pontosan meghatározhatjuk egy nem túl lassan és nem is túlzottan nagy sebességgel haladó test (jármű) mozgását. (Bizonyos sebesség felett a polgári célú GPS készülékek nem működnek. Ennek haditechnikai okai vannak: pl. ne lehessen egy rakétába polgári célú GPS-t szerelni.) A közutakon tehát általában jól használhatjuk a GPS-t, de az iskolaudvaron végzett finomabb mérésekhez nem felelt meg minden esetben ez a módszer.

#### **Az eredmények összehasonlítása**

Összehasonlítottuk az egyes mérési módszerek és eszközök pontosságát [B6]. Ezt úgy végeztük, hogy a kerékpáros előre lemért útvonalon haladt, több GPS-s sportórát is viselt, a kerékpárra több GPS navigációs eszközt és kerékpár-computert is rögzítettünk (4.5. ábra). A többi tanuló stopperokkal mérte a szakaszok megtételéhez szükséges időket, és még videót is készítettünk a kerékpár mozgásáról, amit utólag elemeztünk.



**4.5. ábra** A kerékpárra különböző mérőeszközöket szereltünk: kerékpár-computer, okostelefon, GPS, hogy a megtett távolságokat és a sebességeket összehasonlíthassuk..

A gyorsulások értékeit csak a stopperórás mérésből, és a videofelvétel elemzéséből tudtuk utólag meghatározni. Ebben az esetben egy idealizált mozgást is megvizsgáltunk, ami elég jól közelítette a kerékpár tényleges mozgását. (Az okosmobil esetén csak a kijelzőn láttuk a háromtengelyű gyorsulásmérő szenzor adatait.)

A sebességek meghatározásában a videofelvételek utólagos elemzéséből lehetett a legpontosabb értékeket megkapni. A kamera együtt mozgott a kerékpárral, az elmozdulásokat kb. centiméteres pontossággal tudtuk becsülni. A stopperórás módszer is megfelelő lehet, ha elég sűrűn helyezkednek el a megfigyelők, és elég pontosan tudnak mérni. A kerékpár-computerrel csak az átlagsebességet tudtuk nagyjából pontosan meghatározni.

A GPS-s sportórák kicsit pontatlanabbak voltak az átlagsebesség meghatározásában. Ezeknél vissza lehetett keresni az útszakaszok hosszait, illetve a sebességeket. Az összehasonlíthatóság kedvéért ezeket át kellett konvertálni m/s értékre, mert pl. egyes órák úgy adták meg a sebességet, hogy az adott tempóval haladva mennyi időre lenne szükség 1 km megtételéhez.

A kipróbált okosmobil alkalmazások sem bizonyultak mindig elég pontosnak. A tanulók néhány telefonra letöltöttek ingyenes applikációkat, de a mobilok által mért sebességek néha jelentősen eltértek a stopperórás módszerrel, vagy a videó-elemzős módszerrel, illetve a kerékpár-computerrel mért sebességektől. Természetesen ez nem egy reprezentatív vizsgálat volt, hiszen csak néhány különböző okosmobilt próbáltunk ki. Biztosan vannak pontosabban mérő okostelefon alkalmazások is. (Ezt egy későbbi tesztben szeretnénk részletesebben megvizsgálni.) Megbeszéltük az egyes mérések előnyeit és hátrányait. A különböző módszerek jól kiegészíthetik egymást. A projektfeladat remek lehetőséget kínált arra, hogy a mérést, az adatelemzést, a számításokat együtt gyakoroljuk a hagyományos tanóráktól eltérő módon.

## **5. Energetikai projektfeladat**

A gimnazista tanulókkal megvalósítottunk egy projektfeladatot, amelyben energiaforrások szerepét vizsgáltuk. A témakör hatalmas, szinte végeláthatatlan. A projektben az volt a célom, hogy a legfontosabb ismereteket összegyűjtsük a témában, főként olyanokat, amelyek a középiskolás tananyagban nem, vagy csak kevésbé szerepelnek. Véleményem szerint ezek az ismeretek más középiskolások számára is hasznosak lehetnek.

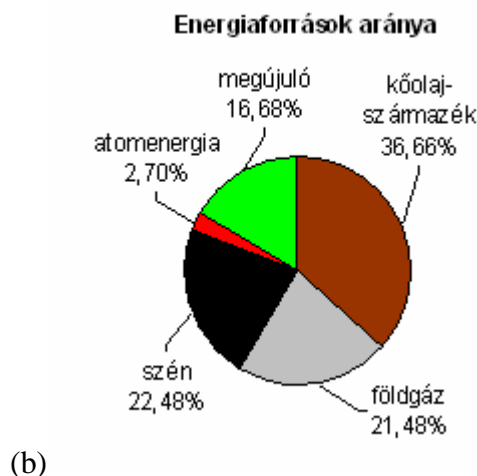
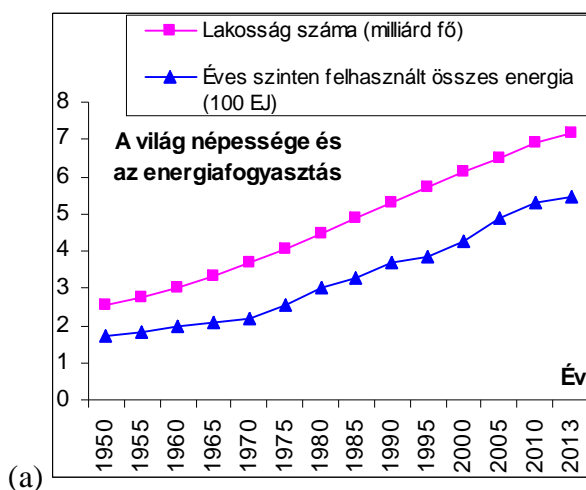
A projektünk 8 nagyobb részből állt: foglalkoztunk az energetikai szektor általános jellemzőivel, a klímaváltozás hatásaival, az Európai Unió és hazánk energiaellátásának jellemzőivel, vizsgáltuk a fosszilis energiahordozók szerepét, az atomenergia szerepét, a megújuló energiaforrások szerepét, készítettünk egy számítógépes programot a megújuló energiaforrások közül a szél- és a napenergia lakossági felhasználásának modellezésére, illetve vizsgáltuk a tavaszi és az őszi óraátállítások energetikai hatásait. Mivel az energetikai projekt 2 és fél tanéven keresztül tartott, ezért lehetetlen lenne minden részét bemutatni. A következőkben néhány érdekesebb részletről számolok be.

Az energetikai szektor a gazdaság egyik legnagyobb volumenű szektora, amely a gazdaság összes ágazatára fontos hatást gyakorol. Az energetikai szektor nagyon összetett; társadalmi, gazdasági, földrajzi, politikai, geopolitikai, hadászati tényezők is befolyásolják.

### **Az energiafelhasználás folytonosan növekszik**

A II. világháború befejezése óta egy viszonylagos béke-korszak időszakát éljük. Természetesen 1945 óta is voltak, és vannak háborús konfliktusok, de szerencsére újabb világméretű háború nem robbant ki. Ebben a relatíve békésebb periódusban a világ népessége folyamatosan gyarapszik, jelenleg kb. 7,4 milliárd ember él a Földön [52].

Az 5.1.a ábra a Föld lakosságát és a lakosság által éves szinten felhasznált összes energiameennyiséget ábrázolja (becsült értékek).



**5.1. ábra** (a) A Föld lakossága és az energiafogyasztás; (b) az energiaforrások részaránya az energiafogyasztásban (becsült értékek). Források: [52, 53, 54].

Látható, hogy a II. világháború befejezése óta a Föld lakossága és az energiafogyasztás is folyamatosan növekszik [52, 53]. A lakosság száma és a felhasznált energia erősen korrelál egymással [54]. A Föld népességének energiafogyasztása 2013-ban kb. 536 EJ volt éves szinten ( $1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$ ) [54]. Az 5.1.b ábra a különböző energiaforrások részarányát mutatja a Föld lakosságának energiafogyasztásában, 2008-as becsült adatok alapján [54].

Az energiatermelésre többségében jellemző, hogy egy adott, lehetséges energiatermelő folyamat felfedezése, vizsgálata, értelmezése, a folyamatra épülő technológia kifejlesztése és ipari alkalmazása között jelentős idő telik el [54 -58]. A tanulókkal példákat kerestünk ennek illusztrálására [55 – 60]. A példák alapján láttuk, hogy sok-sok évtized eltelhet a jelenség felfedezésétől az ipari alkalmazásáig. Ezért is fontos, hogy időben gondolkodjunk a jövőben alkalmazható energiatermelési módokon.

### A projekt indulása

A projekt úgy kezdődött, hogy a 10-ik évfolyamon fizika tanórákon megbeszéltük a villamos-energia előállításának lehetőségeit. Próbáltam a téma fontosságát hangsúlyozni, sajnos nem nagy sikerrel. Nem a tananyag megtanításával volt problémám, hanem azzal, hogy a diákok többsége a villamosenergia-ellátást teljesen magától értetődőnek vette. Mintha ez alapból járna nekünk, vagy legalábbis a fejlett világ polgárai számára.

Hiába hoztam a példákat, hogy hazánkban még a múlt század közepén is sok helyen hiányzott az elektromos hálózat; ezt ők már inkább csak történelmi anekdotának tekintették. Úgy gondolták, hogy a villany lehet hogy valamikor nem volt, de most van és a jövőben is lesz.

A szerencse egy áramszünet formájában jött el. Az történt, hogy egy borús, hideg tavaszi napon egyszer csak fizikaóra közben elment az áram. Volt már máskor is áramszünet az iskolában, de azok legfeljebb néhány percig tartottak; ez az áramszünet viszont több órán keresztül. Se digitális tábla, se világítás; később kiderült, hogy leállt az összes számítógép, a szerverek, a fűtési rendszer, stb. Először persze ováció volt, de miután rájöttek a diákok, hogy a tanulás ilyen körülmények között is folytatódik, akkor már nem voltak olyan vidámak: „*Nem látjuk a táblát. Nem látjuk a könyvet. Nem látjuk a füzetet. Így nem lehet tanulni...*”

Gyerekek, én erről beszéltem! A villamos-energiára ti úgy tekintettetek eddig, hogy az mindenkinek jár. Most megtapasztalhattátok, hogy milyen nehéz lenne nélküle élnünk. Ki tudja, hogy mit hoz a jövő? Lehet, hogy gyakrabban lesznek áramszünetek. Többek között azért tanultok fizikát, hogy megoldást találhassatok a problémára.

A következő fizika órán újra elővettem a témát. Most már sokkal többen fogékonyak voltak iránta. Végezetül abban maradtunk, hogy fizika szakkörön elindítunk egy projektet, amelyben megvizsgáljuk, hogy milyen energiaforrások állnak rendelkezésünkre.

A projektfeladatban a részvétel önkéntes alapon történt. Olyanok is bekapcsolódtak a projektbe, akik előtte nem jártak fizika szakkörre. Azt hiszem, hogy az áramszünet ideje alatt a sötétben kuksolás során sok tanuló elméjében világosság gyúlt.

### **Megújuló energiaforrások**

Megújuló energiaforrásnak nevezzük az olyan energiaforrást, amely természeti folyamatok során folyamatosan rendelkezésre áll, vagy újratermelődik [61]. A megújuló energiaforrások kifejezés egy gyűjtőfogalom, a különböző megújuló energiaforrások felhasználása, alkalmazási lehetőségeik egymástól lényegesen eltérők [54].

A megújuló (zöld esetleg kék) energiaforrások (nap-, víz-, szél-, geotermikus-energia, biomassa, árapály erőmű) jelentik az emberiség számára a leginkább környezetkímélő energiatermelést. Sajnos a pillanatnyi gazdasági érdekek sokszor háttérbe szorítják a felhasználását, mivel léteznek olcsóbb, de a környezetünket szennyező energiaforrások is pl. szén, kőolaj, földgáz [54].

A megújuló energiaforrások intenzívebb felhasználása előnyös mind az ellátásbiztonság, mind a fenntarthatóság, mind a környezetvédelem szempontjából; ezért a megújuló energiaforrások felhasználását mindenütt fokozni kellene [62]. A vízenergia kivételével a megújulók gazdasági szempontból ma még nem mindig versenyképesek az ipari méretű energiatermelési piacon az egyéb energiahordozókkal (pl. atomenergia) szemben, ezért támogatásra szorulnak, szorulhatnak [62].

A helyzetet bonyolítja, hogy egyes megújuló energiaforrások (pl. szél-erőmű) esetében bizonyos rendszerszabályozási problémák merülnek fel; a vízerőművek esetén ilyen jellegű nehézségek általában nincsenek [62]. A megújuló energiaforrások fokozottabb felhasználásának fontos célja a bolygónkon tapasztalható klímaváltozás fékezése [60, 63].

A projektben mindegyik megújuló energiaforrással foglalkoztunk [49, 60, 64, 65, 66], a nap- és a szélenergia jellemzőit részletesebben is vizsgáltuk.

A napenergia forrása a Napban lejátszódó magfúziós folyamat. Ennek az energiának egy része  $3,86 \cdot 10^{26}$  W sugárzási teljesítménnyel szétsugárzódik a Napot körülvevő térbe; a Földön a terjedési irányra merőleges síkban a napsugárzás energiaáramának átlagos sűrűsége kb.  $1360 \text{ W/m}^2$ . Bolygónk közel állandó értékű sugárzási teljesítményt vesz fel; az energiamaximum a 483 nm-es hullámhossznál található. A Föld atmoszférájába bejutó napenergiának átlagosan 30%-a visszajut a világűrbe reflexió és szóródás miatt [54]. A Napból érkező energia a lakosság energiaszükségletének a többszöröse; így a megújuló energiaforrások közül a napenergia hasznosítása lehet a legversenyképesebb alternatíva a jelenlegi energiatermelési módokhoz képest [54]. Magyarországon a földrajzi fekvéstől függően a napos órák száma átlagosan kb. 1900–2200 óra/év érték [54].

A szél a levegő földfelszínhez viszonyított mozgása, mely a légkörben kialakuló nyomáskülönbségek hatására jön létre, és a Föld forgása is szerepet játszik. A XX. században kezdődött el a szél energiájának átalakítása villamos energiává szélturbinákkal [54]. A szél mozgási energiáját elsősorban azokon a vidékeken érdemes kiaknázni, ahol a szélesebb évi átlaga meghaladja a 4–6 m/s értéket. Mivel a szél intenzitása folyamatosan változik, ezért szélerőművet csak olyan helyen érdemes telepíteni, melynek környezeti viszonyai és domborzati fekvése megfelelő a szélenergia kinyerésére. A szélturbinák segítségével állíthatunk elő villamos áramot. A szélturbinákat általában két módon üzemeltetik [54]:

- A villamos-energiát saját célra használják fel; ezt szigetüzemű működésnek nevezik.
- A szélgenerátor által termelt villamos áramot közcélú elosztóhálózatba táplálják.

### **5.1. A nap- és a szélenergia lakossági felhasználásának modellezése**

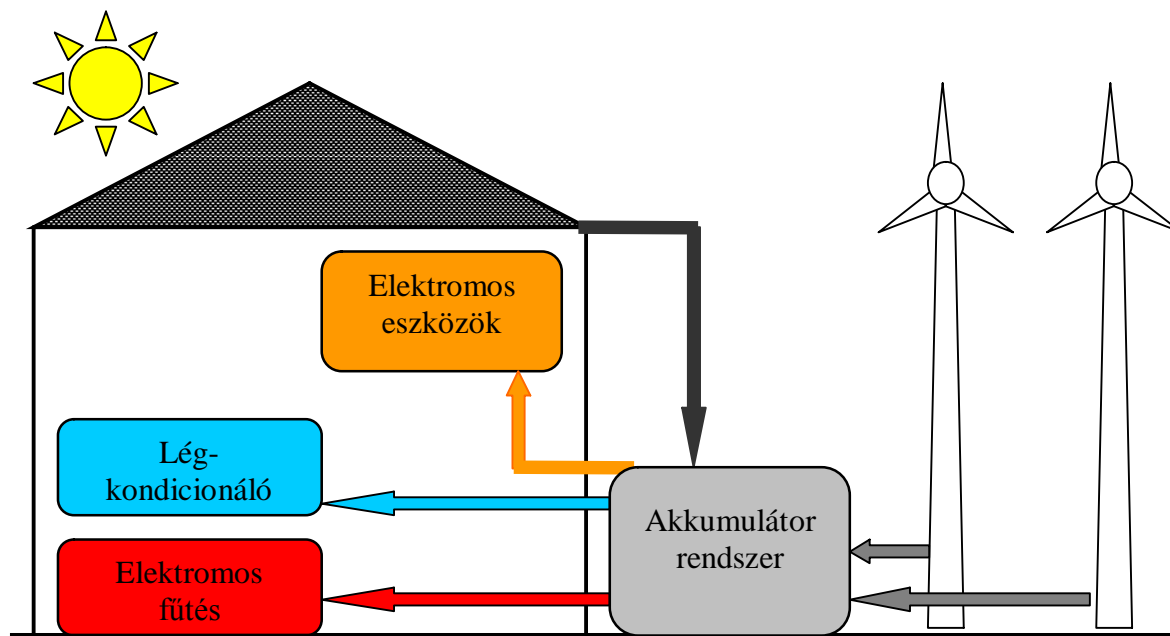
A projektben azon a véleményen voltunk, hogy a nap- és a szélenergia felhasználása lakossági szinten megvalósítható lenne nagyon sok helyen. Akik családi házban (saját ingatlanban) laknak, azok a ház tetejét napelemekkel fedhetnék be; a kertben pedig lehetőség lenne néhány kisebb szélgenerátor felállítására is. Az így termelt villamos energiát pedig részben közvetlenül felhasználhatnák az ott élő lakossági fogyasztók; részben akkumulátorokban lehetne tárolni [B8].

A nap- és a szélenergia hátrányaként szokták emlegetni, hogy az időszakos működés miatt lehet, hogy akkor termelnek villamos energiát, amikor éppen nincs rá szükség; ezért a megtermelt energiát tárolnunk kell, hogy akkor is felhasználhassuk, amikor éppen nincs energiatermelés.

Elméleti szinten több módszer is szóba jöhet: pl. akkumulátorok, vagy vízszivattyús-tározós energiátárolás, vagy vízbontás és a hidrogén eltárolása, stb.; a hatékony energiátárolás azonban nem egyszerű feladat. (Az előállított elektromos energiát hővé is alakíthatjuk, melegvíz-szolgáltatás, illetve fűtési céllal.)

### 5.1.1. A házikó projekt

Ebben a részprojektben azt vizsgáltuk, hogy egy átlagos magyar háztartás energiaszükségletét fedezni tudnánk-e napenergia és szélenergia segítségével. Valódi öko ház építésére nem volt pénzünk; helyette virtuálisan építettünk egy ilyen házikót, napelemekkel és szélgenerátorokkal (5.2. ábra). A tanulókkal közösen készítettünk egy olyan számítógépes modellt, amelyben a ház és a környezetének fontosabb energetikai jellemzőit vizsgáltuk.



5.2. ábra A modell házikó: napelemek a tetőn, szélgenerátorok az udvarban, az elektromos energiát akkumulátorokban tároljuk.

A házikó projektben 3 fő célt fogalmaztam meg [B9]:

- A projektben résztvevő tanulók mérései alapján meghatároztuk egy átlagos háztartás energiafogyasztását: külön vizsgáltuk az elektromos berendezések (háztartási eszközök) energiafogyasztását, a fűtési energiafelhasználást, illetve megbecsültük a hűtési (légkondicionáló berendezés) energiafelhasználást. A projekt részeként a résztvevő tanulók 2 éven keresztül a saját otthonukban figyelték a napi energiafogyasztásukat. Naponta összesítettük az adatokat és kiszámoltuk az átlagértékeket.
- Készítettünk egy egyszerű, középiskolai szinten megérthető matematikai modellt, amely egy napelemekkel és szélgenerátorokkal működő különálló ház energetikai leírására szolgál. A modellünkhöz felhasználtuk más kutatók korábbi eredményeit is.
- Készítettünk egy számítógépes programot, amelyben a tanulói mérések során kapott adatok alapján, a modell segítségével szimulálható egy napelemekkel és szélgenerátorokkal felszerelt különálló ház energetikai működése. A feladat megoldásához táblázatkezelő programot használtunk.



A projektben arra voltunk kíváncsiak, hogy reális adatokkal számolva fenntartható módon működhet-e egy olyan különálló ház, amelynek energiaellátását kizárólag napelemekkel és szélgenerátorokkal biztosítjuk, és a villamos energiát akkumulátorokban tároljuk. A szimulációkkal azt vizsgáltuk, hogy egy átlagos háztartás energiaszükségletét (elektromos eszközök fogyasztása, fűtés, vagy hűtés) fedezni tudnánk-e a napenergia és a szélenergia segítségével, illetve mekkora kapacitású akkumulátor-rendszerre lenne szükségünk a ház fenntartható működéséhez [B9].

A projektben 30 tanuló és jómagam vettünk részt; összességében  $N=31$  háztartás statisztikai adataival dolgoztunk. Elsőként kiszámoltuk, hogy mekkora egy átlagos háztartás. A projektben résztvevők adatai alapján  $n_{\hat{a}} \approx 4$  fő adódott, illetve a házak (lakások) alapterületeinek átlaga  $A_{\hat{a}} \approx 100 \text{ m}^2$ , kerekítve.

### Energia-fogyasztás

A projekt részeként a tanulók saját otthonukban figyelték a napi energiafogyasztásukat, illetve én is feljegyeztem az otthon mért értékeket. Minden résztvevő minden este leolvasta a villanyórák állását, a gázórák állását; illetve szobamérlegen megmérték, hogy aznap mennyi fát, szenet fűtöttek el, akik így (is) fűtenek. A fűtőértékeket táblázatokból kerestük ki. Ezek alapján már mindenki kiszámolhatta az adott napi energiafelhasználását. A lakások hőmérsékletét és a környezet hőmérsékletét is feljegyeztük. Ez az adatgyűjtögetés segítette a tanulókat abban, hogy a hosszú távú munkavégzés fontosságát megértsék.

Az adatokat a következő nap összesítettük, és kiszámítottuk, hogy az előző napon egy  $A_{\hat{a}} \approx 100 \text{ m}^2$  alapterületű átlagos méretű házban összességében mennyi  $E_{\text{össznapiátlag},i}$  energia fogyott átlagosan (elektromos eszközök, fűtés, hűtés). Először mindenki kiszámította az adott napra vonatkozóan a saját otthonában az 1 főre és az  $1 \text{ m}^2$  alapterületre eső energiafogyasztást, majd az értékeket átlagoltuk; ezután megszoroztuk a házikóban lakók számával és a házikó alapterületével.

A házikó összes energiafogyasztását a következőképpen kaptuk meg az  $i$ -ik napra vonatkozóan:

$$E_{\text{össznapiátlag},i} = \frac{A_{\hat{a}} \cdot n_{\hat{a}}}{N} \sum_{j=1}^N \frac{E_{\text{össz},i,j}}{A_j \cdot n_j}, \quad (5.1)$$

ahol  $E_{\text{össz},i,j}$  a  $j$ -ik személy családjának összes energiafogyasztása az  $i$ -ik napon,  $A_j$  a  $j$ -ik személy lakásának területe,  $n_j$  a  $j$ -ik személy lakásában élők száma. Az adatokat 2012. október 1-től kezdődően, 2014. október 1-ig gyűjtöttük. Két évet vizsgáltunk, hogy két teljes fűtési szezon és két teljes fűtés nélküli szezon is reprezentálva legyen [B8, B9].

Az átlagolások alapján az jött ki, hogy a kb.  $100 \text{ m}^2$  alapterületű átlagos házra vonatkoztatva, melyben 4 fő lakik, napi szinten átlagban  $E_{\text{villamosnapiátlag}} = 36,08 \text{ MJ}$  villamos-energiát használnak. A napi átlagos villamosenergia-fogyasztás tekintetében nem volt nagyon jelentős eltérés a fűtési szezon ( $37,23 \text{ MJ/nap}$ ), illetve az azon kívüli időszak ( $34,93 \text{ MJ/nap}$ ) között.

Az egyes napok és az egyes családok tekintetében természetesen jelentős fluktuációk voltak. Az 5.1. számú táblázatban az átlagos háztartás napi átlagos energiaszükséglete látható a fűtési szezonban, illetve azon kívül, az egyszerűség kedvéért kerekített értékekkel.

**5.1. táblázat** Az átlagos háztartás napi átlagos energiaszükséglete.

A felhasznált energia forrása	Átlagos energiafelhasználás [MJ]	
	Fűtési szezonban	Fűtési szezonon kívül
Villany	37	35
Gáz	143	40
Fa	308	0
Szén	21	0
<b>Összesen</b>	<b>509</b>	<b>75</b>

A fűtési szezonban – gyakorlatilag október első felétől április közepéig – a vezetékes földgázfogyasztás naponta átlagban  $4,21 \text{ m}^3$  volt, ami  $E_{\text{gáznapia}}=143 \text{ MJ}$  energiát jelent. (A vezetékes földgáz fűtőértéke  $32\text{--}42 \text{ MJ/m}^3$ , ez a gáz több paraméterétől is függ. Magyarországon a vezetékes földgáz fűtőértéke átlagosan kb.  $34 \text{ MJ/m}^3$ .) Emellett a fűtési szezonban naponta átlagban kb.  $20,5 \text{ kg}$  fát is eltüzelünk a lakások fűtésére. A különböző elégetett fafajták fűtőértékeit súlyozottan vettük figyelembe, így azt kaptuk, hogy a fa elégetéséből  $E_{\text{fanapi}}=308 \text{ MJ}$  energia származott átlagosan naponta a fűtési szezonban. A tanulók közül szénnel alig néhányan fűtöttek (időszakosan); kb.  $1,4 \text{ kg}$  szén fogyott napi átlagban, eszerint kb.  $E_{\text{szénnapi}}=21 \text{ MJ}$  energia származott naponta a szénből a fűtési szezonban.

Felmerülhet a kétely, hogy a fűtési szezonban tényleg ilyen sok energiát fogyaszt egy átlagos háztartás, napi átlagban? Sajnos igen. A projektben résztvevők közül többen hagyományos, kb.  $100 \text{ m}^2$  alapterületű ún. kocka családi házban laknak a családjukkal, és általában gázzal és fával vegyesen fűtenek. (A gázfűtés általában kényelmesebb, de drágább, a fafűtés általában olcsóbb, viszont több fáradsággal jár.) A hőszigeteléstől, nyílászáróktól, hőigénytől, kályhák, kandallók, kazánok típusától függően, egy ilyen kocka családi házban éves szinten kb.  $30\text{--}50$  mázsa kemény tűzifát és kb.  $500\text{--}1000 \text{ m}^3$  földgázt használnak fel a ház fűtésére. A száraz, kemény tűzifák (pl. akác, tölgy, bükk, gyertyán, kőris) fűtőértéke kb.  $15\text{--}16 \text{ MJ/kg}$ , azaz egy fűtési szezonban kb.  $45000\text{--}80000 \text{ MJ}$  az energiafogyasztás. Ha ezt elosztjuk  $185$  nappal, akkor a tűzifa esetén kb.  $243\text{--}432 \text{ MJ/nap}$  átlagos fogyasztást kapunk; a földgáz esetén kb.  $92\text{--}184 \text{ MJ/nap}$  átlagfogyasztást kapunk. Láthatjuk, hogy ezek összhangban vannak az általunk meghatározott átlagértékekkel. (Egy kisebb méretű, korszerűen szigetelt, társas házban lévő lakás esetén a fűtési energiafelhasználás ennek töredéke is lehet; főként, ha a szomszédok alulról-felülről és oldalról is fűtik az adott lakást. Egy szigetelés nélküli, nagyobb méretű, különálló ház esetében viszont a fűtési energiaköltségek nagyon jelentősek.)

Láthatjuk, hogy a fűtési szezonban egyértelműen a fűtéshez használjuk el a legtöbb energiát; ilyenkor egy átlagos háztartásban a villamosenergia-felhasználás másodlagos a fűtéshez viszonyítva. A tanulók adataiból (5.1. táblázat) is kiderül, – ami egyébként országosan is jellemző– hogy a lakosság ténylegesen nem villamos energiát használ a fűtésre [B8]. A villamosenergia-felhasználásban szinte alig van változás a fűtési szezonban és a fűtési szezonon kívül (a kis csökkenés részben annak tudható be, hogy a fűtési szezonon kívül hosszabb ideig van világos, rövidebb ideig égnek a lámpák).

A vizsgálataink szerint összességében egy átlagos háztartás a fűtési szezonban naponta átlagosan kb. 509 MJ, a fűtési szezonon kívül kb. 75 MJ energiát használ fel. Az adott időszakban naponta átlagosan ennyi energiát kellene megtermelnünk ahhoz, hogy a házikónk energetikailag fenntartható legyen. A helyzet ettől persze bonyolultabb, hiszen a felhasznált és a megtermelt energia is naponként változik. Az átlagértékek kiszámítását csak azért mutattam be, mert a tanulóknak a vizsgálatok előtt sejtelmük sem volt, hogy mennyi egy átlagos háztartás naponkénti energiafogyasztása.

A projektben a napi adatok alapján kiszámoltuk a virtuális házikónk és a benne élő 4 fős átlagos család előző napi összes átlagos energiafogyasztását, illetve kiszámoltuk, hogy mennyi energiát tudunk volna az előző napon a virtuális napelemekkel és szélgenerátorokkal megtermelni. A vizsgálataink alapján arra a megállapításra jutottunk, hogy, ha a fűtési szezonon kívül az átlagos háztartásban használatos villamos energia előállítását tekintjük, akkor a virtuális házikónk fenntartható módon működik, azaz a nap- és a szélenergia felhasználásával egy átlagos háztartás villamosenergia-szükségletét biztosítani lehetne. Ne feledjük, hogy a fűtési szezonon kívül (kb. április közepétől október elejéig) általában elég sok a napsütéses órák száma, azaz a fotovoltikus napelemeink szinte minden nap működhetnek. (A szélgenerátorok működése a széltől függ.)

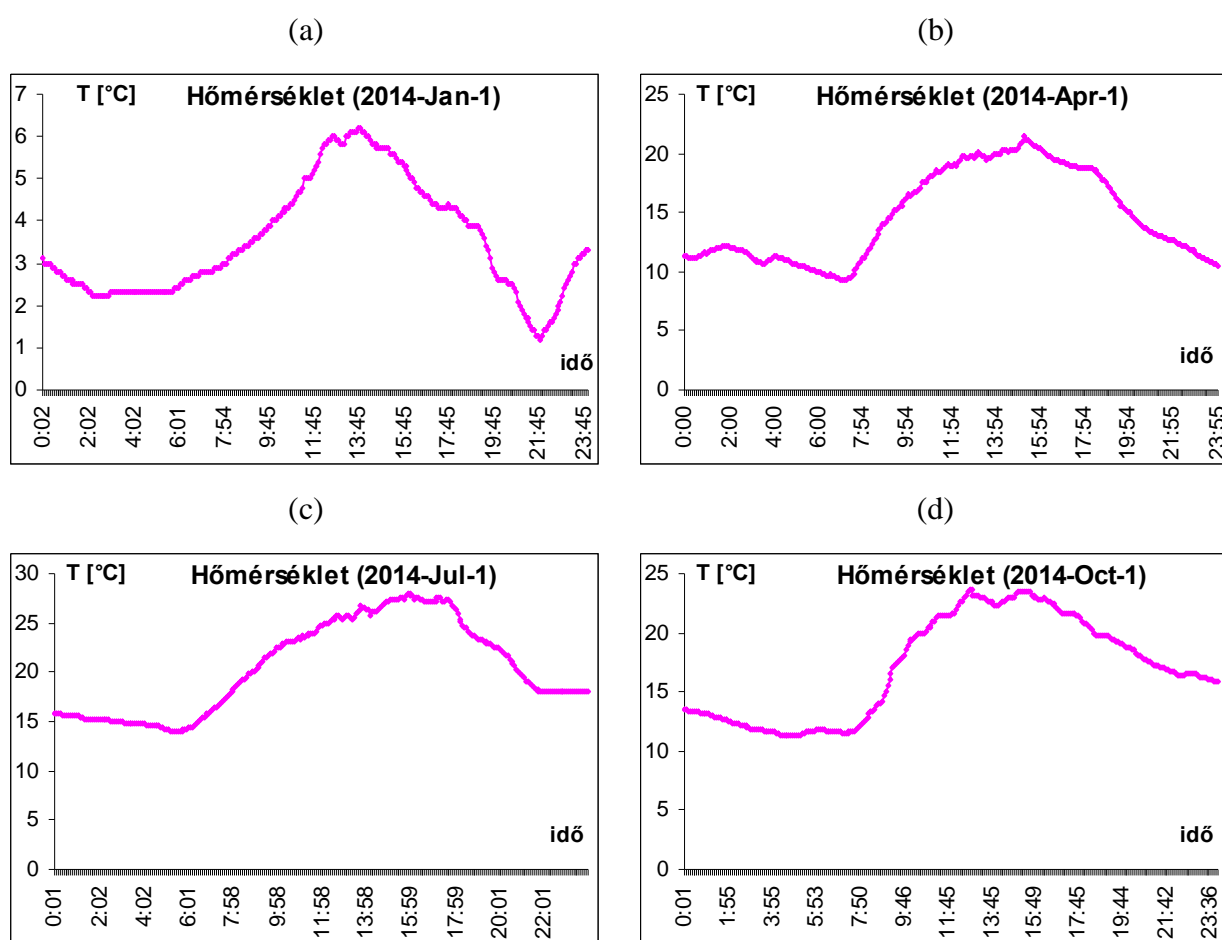
A számításaink szerint a fűtési szezonban a fűtéshez szükséges átlagos energiaigényt viszont ezzel a módszerrel nem tudnánk kielégíteni. A fűtési szezonban (kb. október elejétől április közepéig) a háztartás energiaigénye megnő, viszont általában ilyenkor alacsonyabb a napsütéses órák száma, ezért csak kevesebb villamos energiát lehet a fotovoltikus napelemekkel megtermelni.

Valamilyen kiegészítő megoldásra is szükség van. Egyfelől a ház szigetelését mindenképpen meg kell oldani, másfelől a hőigényünket mérsékelhetjük, ha jobban felöltözünk, így a lakásban alacsonyabb lehet a hőmérséklet. Mondjuk, a ház belsejében 23 °C helyett elegendő lenne 20 °C-os hőmérséklet, és így nagyon sok energiát megtakaríthatunk.

### 5.1.2. A számítógépes program

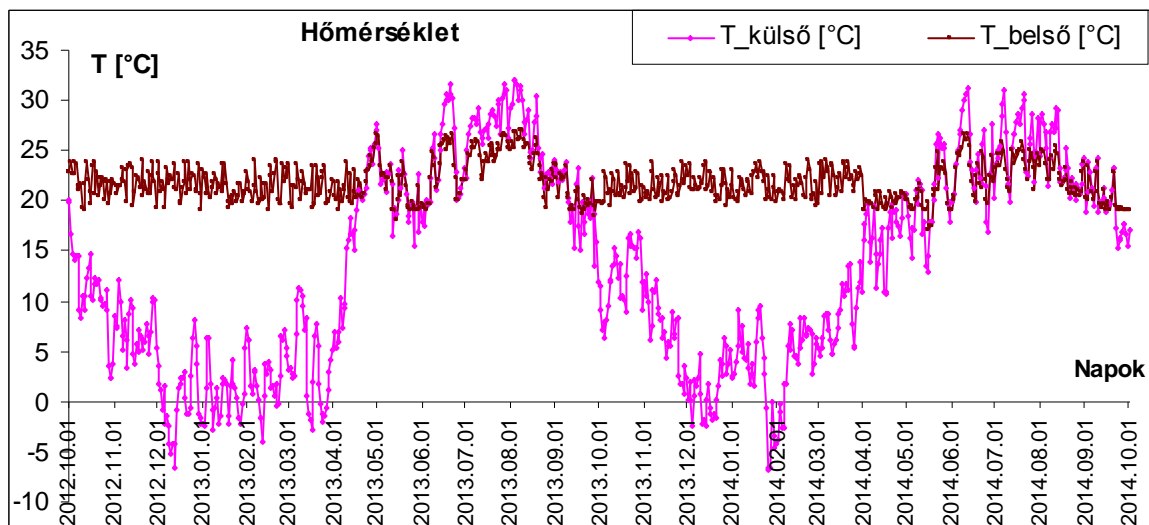
A helyi meteorológiai állomás és a tanulók mérései alapján az átlagolások után rendelkezésre álltak a szükséges napi adatok: mennyi a ház környezetének hőmérséklete, a ház belsejének hőmérséklete, a levegő nyomása, a napsütéses percek száma az adott napon, a szél erőssége, időtartama.

A következőkben bemutatom a különálló házikónk egyszerű energetikai modelljét, illetve a számítások menetét. Szemléltetés céljából 2014-ben minden évszaktól megadok egy-egy jellegzetes hőmérsékleti görbét (2014.01.01., 2014.04.01., 2014.07.01.; 2014.10.01.). Az 5.3. ábrán a kiválasztott napokon a környezet hőmérséklete látható.



**5.3. ábra** A kiválasztott napokon a környezet hőmérséklete: (a) 2014.01.01.; (b) 2014.04.01.; (c) 2014.07.01.; (d) 2014.10.01.

A házak átlagos belső hőmérséklete kb. 20 °C és 25 °C között volt. Néhány napon előfordult kicsivel 20 °C alatti átlagos belső hőmérséklet is. Ilyen napok általában akkor fordultak elő, amikor a fűtési szezon kezdetén még több helyen nem kapcsolták be a fűtést, de már hidegebbre fordult az időjárás, illetve ha tavasszal a fűtési rendszer leállítása után egy-egy napra megint lehűlt az idő, de sokan már nem indították újra a fűtést. A nyári kánikulában előfordult néhány nap, amikor az átlagos belső hőmérséklet 25 °C felett volt. Az 5.4. ábrán a belső és külső hőmérsékletek napi átlagai láthatók a projekt teljes időtartamában.



**5.4. ábra** A belső és külső hőmérsékletek napi átlagai.

Az előzőekben láttuk, hogy a fűtési energiaigény reálisan nem fedezhető a nap- és a szélenergiából a fűtési szezonban. Ezért a program készítése során két megoldás közül választhattunk: vagy lemondunk a fűtésről, vagy olyan jó hőszigetelési paramétereket választunk a háznak, hogy, ezáltal a ház fűtéséhez szükséges energiaigény jelentősen lecsökkenjen, és akkora tárolókapacitású akkumulátor-rendszert telepítünk, ami a szükséges mennyiségű energia tárolására alkalmas. Az első megoldás az egyszerűbb, mert mondhatjuk, hogy pl. fával fűtünk. A másik megoldás bonyolultabb, viszont igazából nem reális abban az értelemben, hogy télen a fűtésre igazából több energiát használunk. Mégis ezt választottuk, azzal az indokkal, hogy a házikó szigetelése tényleg jelentősen javítható: akár lehetnének 4 rétegű hőszigetelt ablakok és 15-20 cm vastag falszigetelések, stb.; és a virtuális akkumulátorok tárolókapacitása elméletben szabadon növelhető.

A hőszigetelés szerepével kapcsolatban végeztünk egy egyszerű kísérletet a kételkedők meggyőzése érdekében. Két műanyag tálban lefagyasztottunk 5–5 l vizet. Az egyik jégtömböt betettük egy vastag hungarocell tároló dobozba és ezt alaposan becsomagoltuk gyapjútakaróba. Ezt a dobozt kitettük az iskola egyik fedett erkélyére, a másik jégtömböt a tállal együtt mellé tettük. Szeptemberben egy napig otthagytuk a jeget a hőszigetelt dobozban és a tálban. Miután kibontottuk a becsomagolt dobozt, a benne lévő jégből alig olvadt el egy kevés, a tálban viszont teljesen elolvadt a jég. Ilyen hőszigetelés nehezen képzelhető el egy háznál, de mégis demonstrálni lehetett ezzel az egyszerű kísérlettel a hőszigetelés szerepét. Ha tehát nagyon jó a ház hőszigetelése, akkor télen sokkal kevesebb energia szükséges a fűtéshez, illetve nyáron a hűtéshez.

A programban az egyszerűség kedvéért a házikót egy belsejében üreges, válaszfalak nélküli téglatesttel modelleztük. A téglatest alaplapjának élhosszait  $a$ -val és  $b$ -vel, a magasságát  $h$ -val jelöltük; a ház falainak vastagságát egységesen  $d$ -nek vettük.

Mindig az előző napi adatokat írtuk be a programba. A virtuális házikó tehát egy napos időeltolódással működött a valósághoz képest. Arra voltunk kíváncsiak, hogy az  $i$ -ik napon a virtuális házikóban mennyi energiát kell felhasználni ahhoz, hogy a ház átlagos belső hőmérsékletét ( $T_{\text{belsőátlag},i}$ ) olyan értéken tarthassuk, amit a tanulók átlagban mértek otthon, illetve a ház villamosenergia-igényét is megoldjuk.

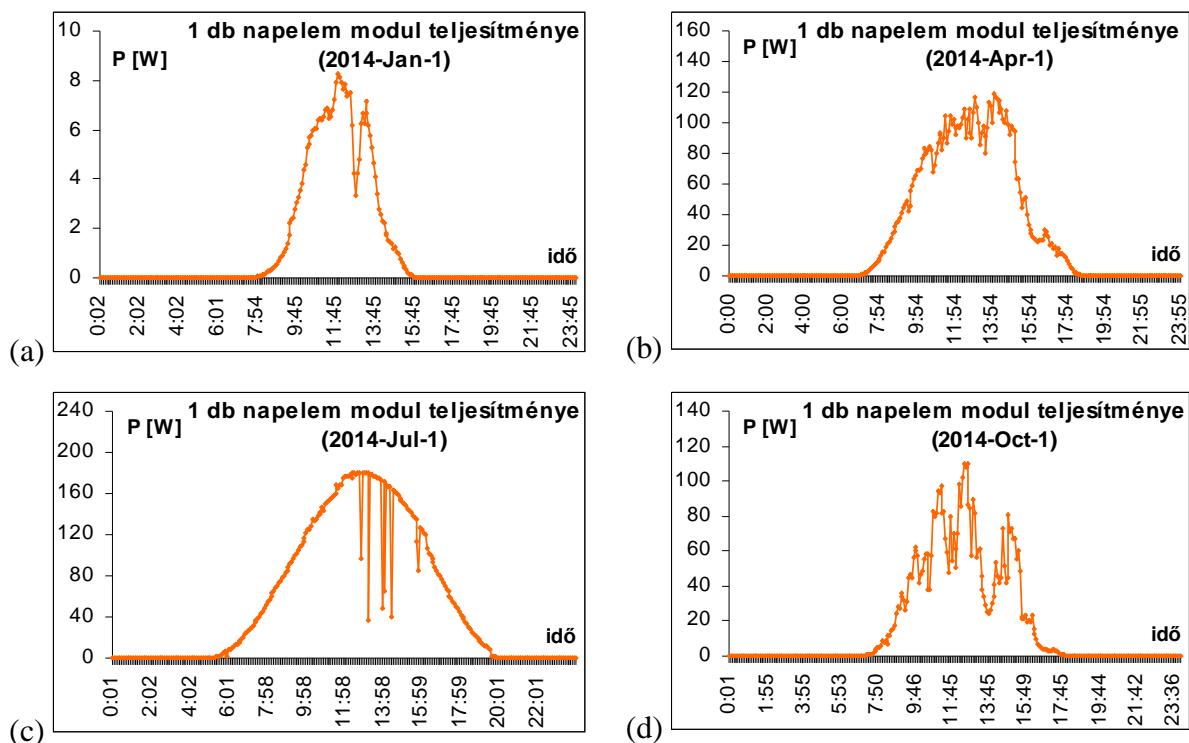
A programban az egy napos időcsúszásra azért volt szükség, hogy az előző napi összesített helyi meteorológia adatok (pl. helyi napsütéses percek száma, fényteljesítmény sűrűség, helyi szélviszonyok) rendelkezésünkre álljanak. A hőmérséklet adatokat a projektben résztvevő tanulók feljegyezték otthon, illetve napközben az iskolában, és a helyi meteorológiai állomás adatait is felhasználtuk. A különböző forrásokból származó adatokat összesítettük és átlagoltuk.

### Napenergia

A napelemek az elektromágneses sugárzás felhasználásával működnek. Egy napelem elektromos teljesítménye [67]:

$$P_{\text{napelem}}(t) = \eta_{\text{napelem}} \cdot A_{\text{napelem}} \cdot I(t), \quad (5.2)$$

ahol  $A_{\text{napelem}}$  1 db napelem területe;  $I(t)$  a napsugárzás átlagos felületi teljesítménysűrűsége a tetőnél. Az  $\eta_{\text{napelem}}$  a napelem fotovoltaiikus energia átalakítását jellemző hatásfok. A napelem hatásfoka függ a technológiától és a típustól [68]. A kereskedelmi forgalomban kapható napelemek hatásfoka tipikusan 12% és 17% közötti érték [69, 70]; a szimulációknál mi általában 15%-os hatásfokkal számoltunk. Az 5.5. ábrán a kiválasztott napokon 1 db 1 m<sup>2</sup>-es felületű és 15%-os hatásfokú napelem modul elektromos teljesítménye látható.



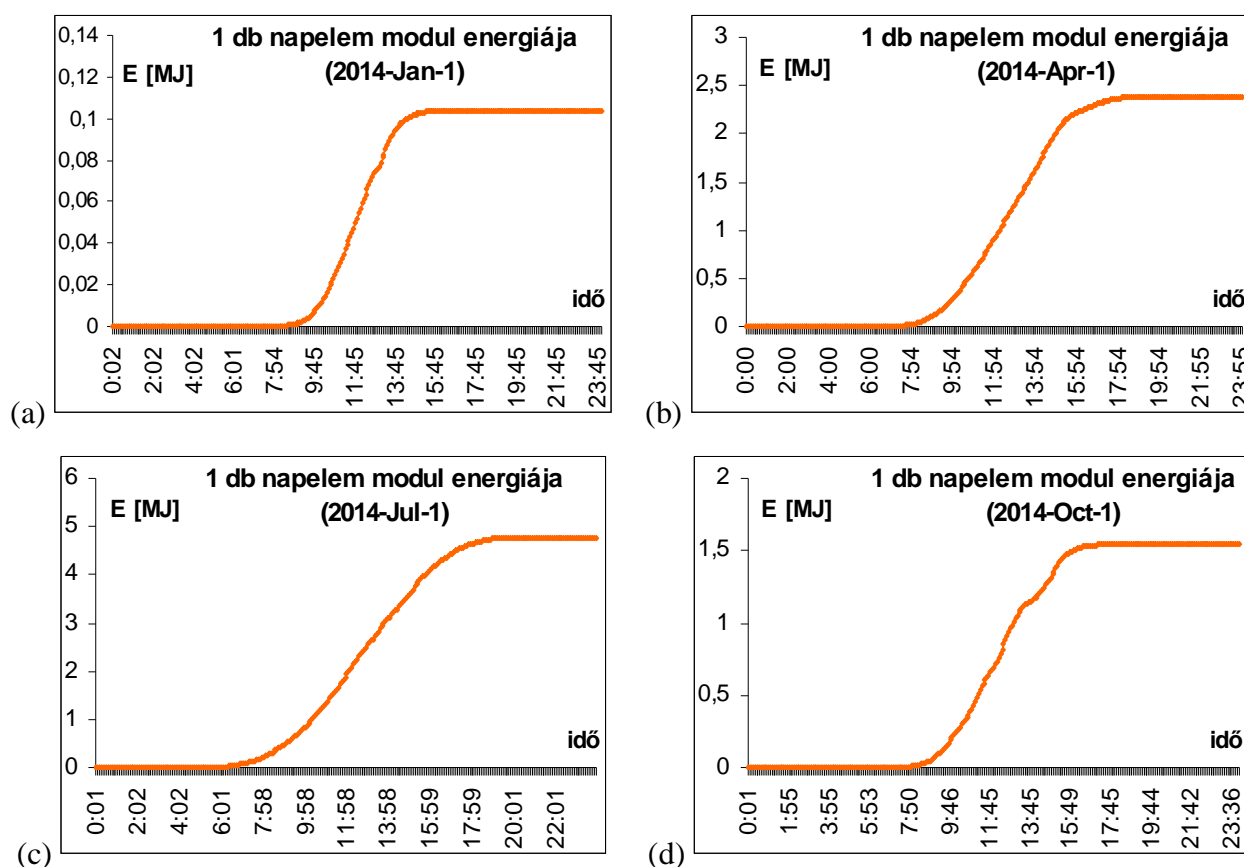
**5.5. ábra** A kiválasztott napokon 1 db 1 m<sup>2</sup>-es felületű és 15%-os hatásfokú napelem modul elektromos teljesítménye: (a) 2014.01.01.; (b) 2014.04.01.; (c) 2014.07.01.; (d) 2014.10.01.

Az  $i$ -ik napon a napelemek által termelt összes villamos energiát úgy kapjuk, hogy a működő napelemek számát, a napelem pillanatnyi teljesítményét, és a működés rövid időtartamát ( $\Delta t$ ) összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük a teljes nap folyamán:

$$E_{\text{napelem},i} = \sum_{t=i_0}^{i_0+T_{\text{nap}}} P_{\text{napelem}}(t) \cdot N_{\text{napelem}}(t) \cdot \Delta t, \quad (5.3)$$

ahol  $E_{\text{napelem},i}$  az  $i$ -ik napon a ház tetején elhelyezett napelemek által megtermelt összes villamos energia;  $N_{\text{napelem}}$  a működő napelemek száma. Az  $i_0$  az  $i$ -k nap kezdetét jelenti, a  $T_{\text{nap}}$  egy teljes napot jelöl. (A szummázást az  $i$ -ik napra végeztük el.)

A vizsgálatainkban a  $\Delta t$  értéke 5 perc volt, mert a helyi meteorológiai állomás adatai 5 percenként frissültek. Az 5.6. ábrán a kiválasztott napokon 1 db 1 m<sup>2</sup>-es napelem modul által termelt összes elektromos energia látható.



**5.6. ábra** A kiválasztott napokon 1 db 1 m<sup>2</sup>-es napelem modul által termelt összes elektromos energia: (a) 2014.01.01.; (b) 2014.04.01.; (c) 2014.07.01.; (d) 2014.10.01.

Ha összehasonlítjuk a kiválasztott téli és nyári napot, akkor megfigyelhetjük, hogy kb. 45-ször annyi elektromos energiát termeltünk a kiválasztott nyári nap alatt, mint a téli napon. Ez érthető, mert egyrészt sokkal nagyobb volt nyáron a napelem elektromos teljesítménye, másrészt sokkal hosszabb ideig működött a napelem.

A virtuális házikó tetején helyezkednek el a napelemek. (A valóságban akár a kertben is felállíthatnánk még külön napelem modulokat, vagy a ház oldalára is szerelhetnénk néhányat.)

A modell szerint legfeljebb annyi napelemünk lehet, amennyi elfér a tetőn. Úgy képzeltük, hogy egy adott pillanatban tetszőleges egész számú napelemet használhatunk ( $0 \leq N_{\text{napelem}} \leq N_{\text{napelem\_max}}$ ), feltéve, hogy a működés feltételei adottak. Napsütéses időben, ha nem működik az összes napelem modul, és szükség lenne még elektromos energiára a házikó működtetéséhez, vagy az akkumulátor rendszer nincs teljesen feltöltve, akkor bekapcsolhatunk még napelem modulokat. Ha az akkumulátor rendszer teljesen fel van töltve és a házikó működtetéséhez sem használjuk el a napelemek által termelt energiát, akkor elméletben lekapcsolhatunk néhány napelem modult. A modellünkben az egyszerűség kedvéért úgy képzeltük, hogy elméletben bármikor szabadon bekapcsolhatunk egy napelem modult, ha süt a nap; illetve szabadon kikapcsolhatunk egy napelem modult, ha nincs rá szükség.

### Szélenergia

A tanulókkal megnéztünk egy egyszerűsített modellt, amelyben egy szélgenerátor teljesítményét határozhatjuk meg [71]. A modellt Albert Betz német fizikus dolgozta ki [72].

A modellben  $\Delta m$  tömegű levegőmennyiség áramlik át a szélgenerátoron  $\Delta t$  idő alatt, miközben a légtömeg keresztülmegy a szélkeréken, a kezdeti konstans  $v_1$  sebességről, a végső konstans  $v_2$  sebességre lassul. A tömegmegmaradást kifejező kontinuitási egyenlet:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho_{\text{levegő}} \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_{\text{levegő}} \cdot A \cdot v = \rho_{\text{levegő}} \cdot A_2 \cdot v_2, \quad (5.4)$$

ahol  $\dot{m}$  a levegő tömegárama,  $A_1$  a légáram keresztmetszete a szélgenerátor előtt,  $v_1$  a légáram sebessége a szélgenerátor előtt,  $A$  az idealizált szélgenerátor keresztmetszete,  $v$  az áramlás sebessége a szélgenerátornál,  $A_2$  a légáram keresztmetszete a szélgenerátor után, és  $v_2$  a légáram sebessége a szélgenerátor után. A modellben összenyomhatatlan közeget feltételezünk (a hangsebességnél jóval kisebb sebességű áramlásoknál ez gázokra is jó közelítés), a keresztmetszet változik. Az áramvonalak lesznek széttartóak aszerint, ahogy a sebesség változik.

A kiszemelt légtömeg impulzusa  $\Delta t$  idő alatt  $\Delta m \cdot (v_2 - v_1)$  értékkel változik. A szélgenerátoron átáramló levegőre ható erő nagysága:

$$F = \frac{\Delta m \cdot (v_1 - v_2)}{\Delta t} = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \quad (5.5)$$

A szélgenerátor rotorján  $v$  sebességgel átáramló levegőre állandó  $F$  erő hat, melynek nagyságát (5.5) adja meg, és aminek a sebességgel azonos irányú ellenereje hat a generátorra, tehát a szélgenerátor teljesítménye:

$$P_{\text{szélgenerátor}} = F \cdot v. \quad (5.6)$$

Az (5.5) és az (5.6) egyenletek alapján írhatjuk

$$P_{\text{szélgenerátor}} = \dot{m} \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (5.7)$$

A modell szerint nincs hőátadás a rendszerben. A szélgenerátoron átáramló levegő mozgási energiája csökken. A munkatétel értelmében írhatjuk

$$P_{\text{szélgenerátor}} = \frac{\Delta E_{\text{mozgási}}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (5.8)$$

Az (5.7) képletet az (5.8)-ba helyettesítve kapjuk

$$v = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \quad (5.9)$$



Az (5.4) és az (5.9) eredményét visszahelyettesítjük az (5.8) egyenletbe:

$$P_{szélgenerátor} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{levegő} \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{levegő} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) =$$

$$= \frac{1}{2} \rho_{levegő} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (v_1^3 + v_2 \cdot v_1^2 - v_1 \cdot v_2^2 - v_2^3) = \frac{1}{2} \rho_{levegő} \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right). \quad (5.10)$$

Az időegység alatt a generátor keresztmetszetén eredetileg (ha nincs ott a generátor) átáramló levegő kinetikus energiája:

$$P_{légáram} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{levegő} \cdot A \cdot v_1^3. \quad (5.11)$$

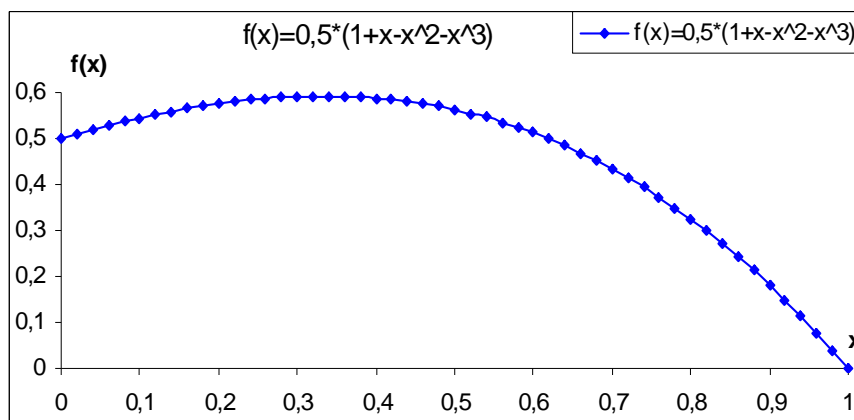
A hatásfok megadja, hogy ennek hányadrészét lehet ténylegesen kinyerni [71]:

$$\eta_{szélgenerátor} = \frac{P_{szélgenerátor}}{P_{légáram}} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right). \quad (5.12)$$

Vezessük be az  $x=v_2/v_1$  jelölést:

$$\eta_{szélgenerátor} = f(x) = \frac{1}{2} \cdot (1 + x - x^2 - x^3), \quad (5.13)$$

Mivel  $x$  a szélgenerátor utáni és a szélgenerátor előtti sebességek arányát jelenti, ezért értéke 0 és 1 közé eshet. A tanulókkal ábrázoltuk az  $f(x)=0,5 \cdot (1+x-x^2-x^3)$  függvényt 0 és 1 között. Ez látható az 5.7. ábrán.



**5.7. ábra** A szélgenerátor hatásfokát kifejező  $f(x)=0,5 \cdot (1+x-x^2-x^3)$  függvény 0 és 1 között ( $x=v_2/v_1$ ).

Az  $f(x)$  függvény maximumát megkaphatjuk, ha deriváljuk a függvényt:

$$f'(x) = \frac{1}{2} \cdot (-2 \cdot x - 3 \cdot x^2), \quad (5.14)$$

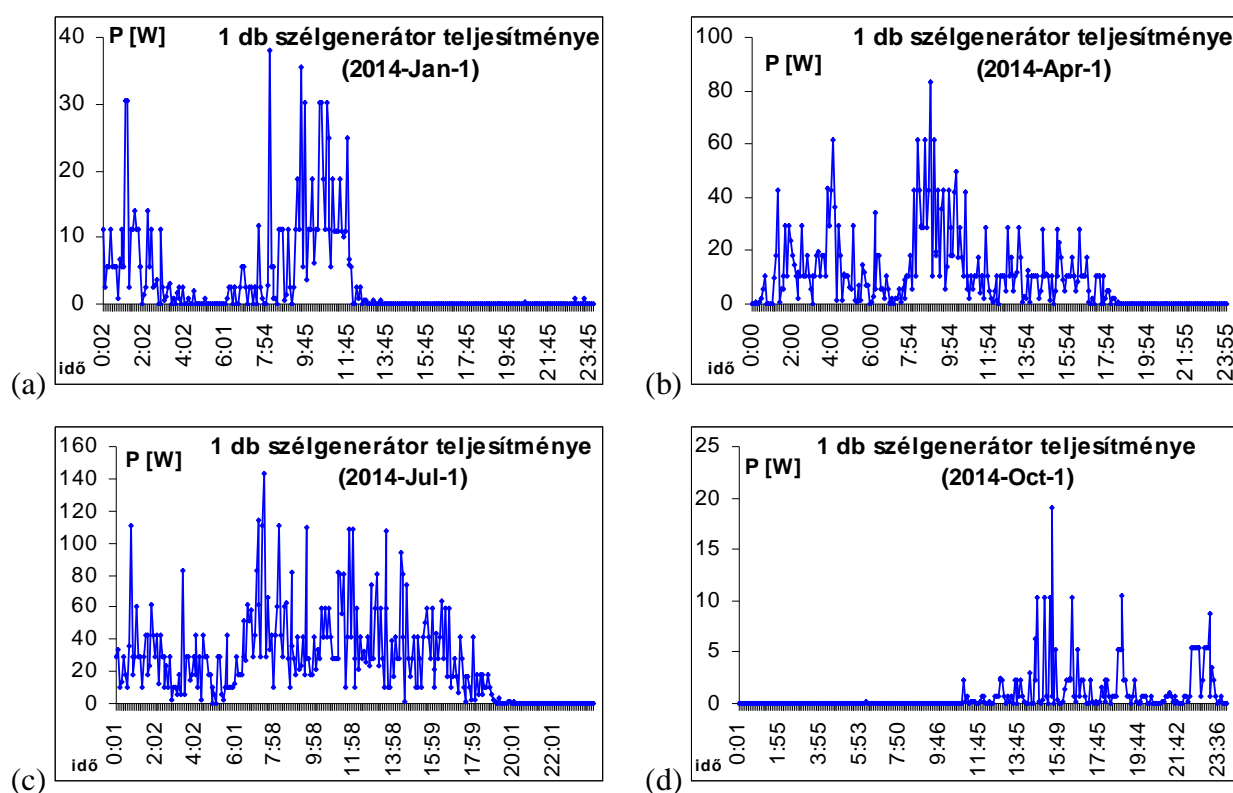
Az  $f'(x)=0$  egyenlet megoldása  $x=1/3$  a 0 és 1 közötti tartományban. (Az  $f''(x)$  függvény értéke ezen a helyen negatív.) A szélgenerátornak akkor lesz maximális a hatásfoka, ha a szélgenerátor utáni és a szélgenerátor előtti sebességek aránya  $1/3$  ( $v_2/v_1=1/3$ ). Helyettesítsük vissza ezt az értéket a szélgenerátor hatásfokához; így megkapjuk, hogy elméletileg mekkora lehet a maximális hatásfok:

$$\eta_{szélgenerátor\_max} = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{1}{3} - \left( \frac{1}{3} \right)^2 - \left( \frac{1}{3} \right)^3 \right) = \frac{16}{27}. \quad (5.15)$$

Betz szerint egy szélgenerátor maximális hatásfoka  $16/27$ , azaz kb. 59,3% [71, 72, 73]. A modern, nagyméretű szélgenerátorok hatásfoka általában 40-50% körül van; a kisebb méretű szélgenerátorok hatásfoka ettől kisebb szokott lenni [74, 75].

A házikó kertjében csak kisebb méretű szélgenerátorok férnek el. A szimulációk során  $4 \text{ m}^2$ -es rotor-felzínnel számoltunk és a szélgenerátor hatásfokát 25%-nak vettük. A levegő sűrűségét a gáz állapotegyenletéből számítottuk ki:  $\rho = p \cdot M \cdot R^{-1} \cdot T^{-1}$ , ahol  $p$  a gáz nyomása,  $M$  a levegő moláris tömege,  $R$  az univerzális gázállandó,  $T$  az abszolút hőmérséklet [76].

Mivel a helyi meteorológiai állomás adatai 5 percenként frissültek, ezért a sűrűségeket is és a szélességeket is 5 percenként vizsgáltuk. Az 5.8. ábrán a kiválasztott napokon 1 db  $4 \text{ m}^2$ -es rotor-felzínnű és 25%-os hatásfokú szélgenerátor elektromos teljesítménye látható.



**5.8. ábra** A kiválasztott napokon 1 db  $4 \text{ m}^2$ -es rotor-felzínnű és 25%-os hatásfokú szélgenerátor elektromos teljesítménye: (a) 2014.01.01.; (b) 2014.04.01.; (c) 2014.07.01.; (d) 2014.10.01.

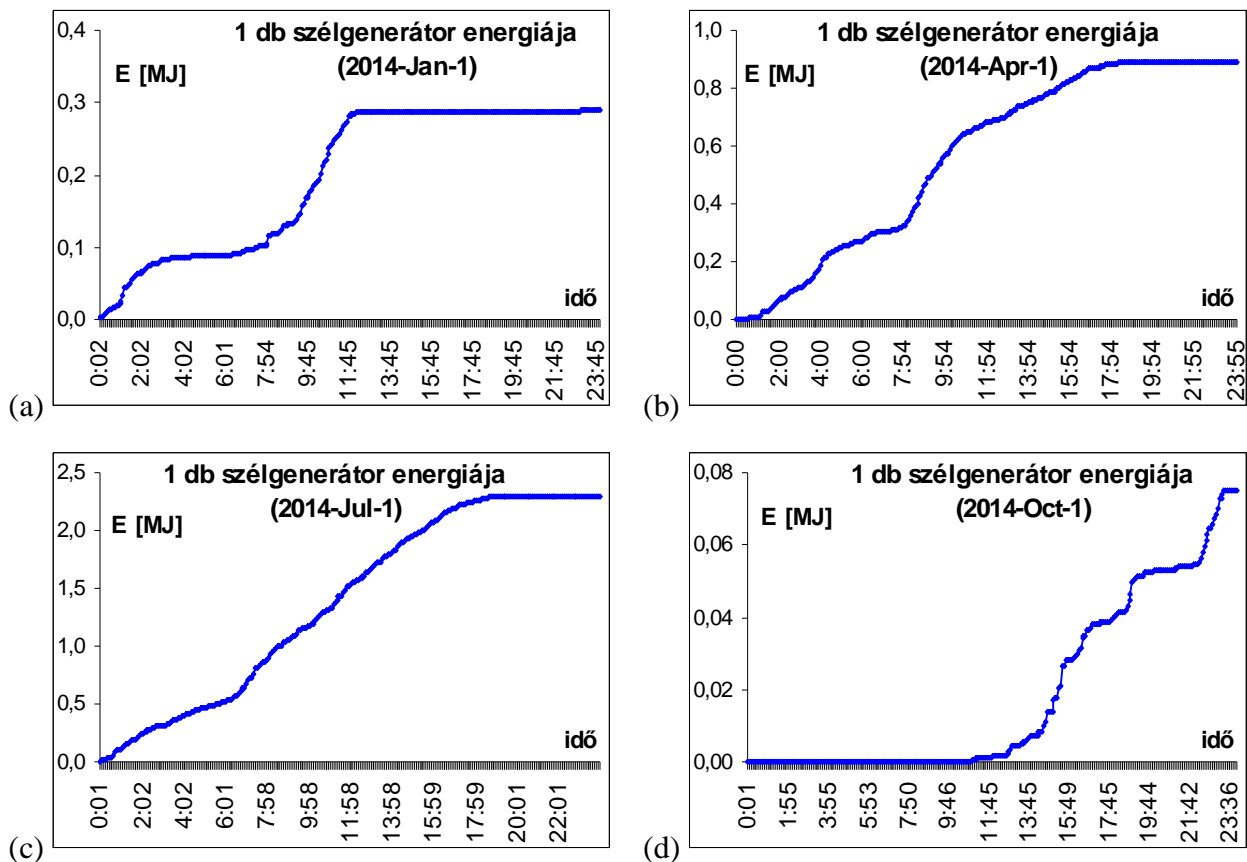
Az  $i$ -ik napon a házikónk mellett felállított szélgenerátorok által megtermelt összes elektromos energiát úgy kapjuk, hogy a működő szélgenerátorok számát, a szélgenerátorok pillanatnyi teljesítményét, és a működés rövid időtartamát ( $\Delta t$ ) összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük a teljes nap folyamán:

$$E_{szélgenerátor,i} = \sum_{t=i-0}^{i-0+T_{nap}} P_{szélgenerátor}(t) \cdot N_{szélgenerátor}(t) \cdot \Delta t, \quad (5.16)$$

ahol  $E_{szélgenerátor,i}$  az  $i$ -ik napon a szélgenerátorok által megtermelt összes villamos energia;  $N_{szélgenerátor}$  a működő szélgenerátorok darabszáma.

A szélgenerátorok csak megfelelő szélesség tartományban működhetnek, kb. 1,5 m/s és 20 m/s között. Túl alacsony szélesség esetén nem is működnek, vagy nem gazdaságos a működtetésük; túl magas szélesség esetén nem biztonságosak; ezért csak a megfelelő tartományba eső értékeket vettük figyelembe.

Az 5.9. ábrán a kiválasztott napokon 1 db 4 m<sup>2</sup>-es rotor-felületű és 25%-os hatásfokú szélgenerátor által termelt összes elektromos energia látható.



**5.9. ábra.** A kiválasztott napokon 1 db 4 m<sup>2</sup>-es rotor-felületű és 25%-os hatásfokú szélgenerátor által termelt összes elektromos energia: (a) 2014.01.01.; (b) 2014.04.01.; (c) 2014.07.01.; (d) 2014.10.01.

Miért írtuk a képletbe a működő szélgenerátorok számát? Az elméleti modellünkben tetszőleges (nemnegatív egész) számú szélgenerátorunk lehet. Elméletben korlátlanul növelhetnénk a szélgenerátorok számát; a valóságban természetesen legfeljebb csak néhány szélgenerátor fér el a házikó mellett, ezért a szimulációk során mi is csak néhány darab szélgenerátorral számoltunk.

Ha több szélgenerátorral számolunk, akkor elméletben előfordulhatna olyan eset, hogy széles időben olyan sok elektromos energiát termelünk, amennyit már nem fogyasztunk el, és a véges kapacitású akkumulátor-rendszerben sem tudunk eltárolni, ha az teljesen fel van töltve. Ebben az esetben elméletben leállíthatunk néhány szélgenerátort, hogy feleslegesen ne termeljenek villamos energiát, pl. óvjuk a berendezéseket a kopástól, elhasználódástól.

Elméletileg az is előfordulhatna, hogy különböző méretű szélgenerátoraink vannak. Ha a szél mérsékelt erősségű, akkor lehetséges, hogy mindegyiket tudjuk működtetni. Ha viszont a szél sebessége növekszik, akkor előfordulhat olyan eset, hogy a felszín közelében a szél erőssége még elfogadható értékű, ezért a kisebb méretű szélturbinákat még működtethetjük, viszont a magasabb szélgenerátorokat már le kell állítanunk biztonsági okokból; mert a földfelszíntől magasabban a szélesebesség olyan nagy, hogy az már veszélyes lenne a nagyobb méretű szélturbinákra.

A modellünkben az egyszerűség kedvéért úgy képzeltük, hogy elméletben bármikor szabadon elindíthatunk egy szélgenerátort, ha a szél sebessége a megfelelő tartományban van; illetve szabadon leállíthatunk egy szélgenerátort, ha nincs rá szükség, vagy nem biztonságos a működtetése.

A napsugárzás és a szélviszonyok is napról-napra, sőt percről-percre változtak. Mindig csak a következő napon számítottuk ki, hogy az előző napon mennyi energiát termeltünk a napelemekkel, illetve a szélgenerátorokkal.

### **A ház és környezete közötti energia transzport**

A ház a szabad felszínén cserélhet energiát a környezetével. Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a ház az alaplapja irányában nagyon jól hőszigetelve van; azaz csak a tetején, illetve az oldallapjain adhat le, vagy vehet fel energiát. A ház szabad felszíne ezek alapján  $A_{szabad} = a \cdot b + 2 \cdot (a + b) \cdot h$ .

A szabad felszínnel arányos hőcsere egyfelől függ a külső hőmérséklet és a belső hőmérséklet különbségétől, illetve a ház szabad felszínének (tető + oldalfalak) hőátbocsátó képességétől. Ha a tetőnek és a falaknak jó a hőátbocsátó képessége, akkor rossz a hőszigetelésük. A hőátbocsátó képesség és a hőszigetelő képesség fordítottan arányosak. A ház szabad felszínén a hőátbocsátási teljesítmény [76]:

$$P_{h\ddot{o}at} = k \cdot A_{szabad} \cdot (T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} - T_{b\ddot{e}ls\ddot{o}}) \quad (5.17)$$

ahol  $P_{h\ddot{o}at}$  a ház és környezete közötti hőátbocsátási teljesítmény,  $T_{b\ddot{e}ls\ddot{o}}$  a ház belső hőmérséklete,  $T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$  a ház környezetében mért külső hőmérséklet. A  $k$  a ház szabad felszínének hőátbocsátási együtthatója; a programban megadott értéktartományban választható paraméter.

Az  $i$ -ik napon a hőátbocsátás során a teljes energiáttranszportot ( $E_{h\ddot{o}at,i}$ ) megkapjuk, ha a pillanatnyi hőátbocsátási teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük az adott napra vonatkozóan:

$$E_{h\ddot{o}at,i} = \sum_{t=i-0}^{i-0+T_{nap}} P_{h\ddot{o}at}(t) \cdot \Delta t. \quad (5.18)$$

A ház hőszigetelés útján is leadhat, vagy felvehet energiát. A Stefan-Boltzmann törvény szerint a sugárzási teljesítmény függ a test felszínének nagyságától; a test, illetve a környezet abszolút hőmérsékletének negyedik hatványainak különbségétől [77]:

$$P_{hösug} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{szabad} \cdot (T_{külső}^4 - T_{belső}^4) \quad (5.19)$$

ahol  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  a Stefan-Boltzmann együttható;  $\varepsilon$  az emissziós tényező, ez függ a ház szabad felszínének anyagától, szemcsézettségétől, színétől, stb. is. (A frekvenciafüggést elhanyagoltuk az egyszerűség kedvéért.)

Az  $i$ -ik napon a hőszigetelés során a teljes energiáttranszportot ( $E_{hösug,i}$ ) megkapjuk, ha a pillanatnyi hőszigetelési teljesítményeket és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük az adott napra vonatkozóan:

$$E_{hösug,i} = \sum_{t=i-0}^{i-0+T_{nap}} P_{hösug}(t) \cdot \Delta t. \quad (5.20)$$

Ha  $E_{hőát,i} + E_{hösug,i} > 0$ , akkor a háziko összességében energiát vesz fel a falakon és a tetőn keresztül az  $i$ -ik napon a környezetétől; ha  $E_{hőát,i} + E_{hösug,i} < 0$ , akkor a háziko összességében energiát ad le a szabad felszínén a környezetének az adott napon.

### Fűtés

A modellben a fűtési szezonban az adott napon a kívánt belső hőmérséklet eléréséhez a házikót  $P_{füt}$  elektromos teljesítményű villanykályhával fűtjük. Az  $i$ -ik napon villanykályha működéséhez szükséges összes energiát ( $E_{füt,i}$ ) megkapjuk, ha a pillanatnyi fűtési teljesítményt és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük az adott napra vonatkozóan.

$$E_{füt,i} = \sum_{t=i-0}^{i-0+T_{nap}} P_{füt}(t) \cdot \Delta t. \quad (5.21)$$

A villanykályha által leadott (hasznos) hő, amely a háziko belső energiáját növeli az  $i$ -ik napon:

$$E_{füt\text{hasznos},i} = \eta_{füt} \cdot E_{füt,i}, \quad (5.22)$$

ahol  $\eta_{füt}$  a villanykályha fűtési hatásfoka. (Ellenállásfűtés esetén a teljes villamos energia hővé alakul. Némelyik szimulációnál pl. 99%-os hatásfokkal számoltunk, mert az elektromos fűtőberendezés ventilátorainak forgatásához is kell energia.)

Ha a fűtési szezonban a megkívánt belső hőmérséklet kisebb az aktuális külső hőmérséklettől, azaz  $T_{belső} < T_{külső}$ , akkor a fűtésre nem kell energiát elhasználnunk, mert a modell szerint egyszerűen kinyitjuk a virtuális ablakokat és annyi melegebb levegőt engedünk be kintről, hogy elérjük a megkívánt belső hőmérsékletet. (Egy meleg őszi napon a valóságban sem kell a lakást külön fűteni.)

## Hűtés

A nyári szezonban a lakás hűtésére felhasznált hűtési energiát hasonló képletekkel számíthatjuk ki, az előjelek figyelembe vételével. A házikót  $P_{hűt}$  elektromos teljesítményű légkondicionálóval hűtjük.

Az  $i$ -ik napon a légkondicionáló működéséhez szükséges villamos energiát ( $E_{hűt,i}$ ) megkapjuk, ha a légkondicionáló berendezés pillanatnyi hűtési teljesítményét és a rövid  $\Delta t$  időtartamokat összeszorozzuk, majd ezeket összesítjük az adott napra vonatkozóan:

$$E_{hűt,i} = \sum_{t=i-0}^{i-0+T_{nap}} P_{hűt}(t) \cdot \Delta t. \quad (5.23)$$

Az  $i$ -ik napon a légkondicionáló által elvont (hasznos) hő, amely a házikó belső energiáját csökkenti:

$$E_{hűhasznos,i} = j_{hűt} \cdot E_{hűt,i}, \quad (5.24)$$

ahol  $j_{hűt}$  a légkondicionáló hűtési jósági foka. A modern légkondicionáló berendezések hűtési jósági foka általában 2,5 és 3,5 közötti érték szokott lenni [78, 79].

Ha a nyári szezonban a megkívánt belső hőmérséklet nagyobb az aktuális külső hőmérséklettől, azaz  $T_{belső} > T_{külső}$ , akkor a hűtésre nem kell energiát felhasználnunk, mert a modell szerint egyszerűen kinyitjuk a virtuális ablakokat és annyi hidegebb levegőt engedünk be kintől, hogy elérjük a megkívánt belső hőmérsékletet. (Egy hűvösebb nyári napon a valóságban sem kell a lakást külön hűteni.)

A házikóban a villanykályha és a légkondicionáló kivételével a többi elektromos berendezés által elfogyasztott villamos energiát külön számoltuk; az  $i$ -ik napon ezt  $E_{villamos,i}$ -vel jelöltük.

A modellünkben a különböző együtthatókat úgy választottuk, hogy reális legyen az értékük (pl. az egyes határfokokat katalógusokból kerestük ki); a szabad paramétereket úgy próbáltuk illeszteni, hogy a lehető legjobban visszaadják a tanulói mérésekből számított átlagértékeket.

## Tárolt energia

### Házikó

A ház falaiban és a bent lévő levegőben belső energiaként tárolódik a házikó energiájának jelentős része. (Az egyszerűsített modellünkben a házikóban nincsenek belső válaszfalak.) A bent lévő levegő belső energiája függ a levegő sűrűségétől ( $\rho_{levegő}$ ), térfogatától ( $V_{levegő}$ ) és izokor fajhőjétől ( $c_{levegő}$ ). A levegő sűrűsége függ a hőmérsékletétől és a nyomásától.

A ház falainak belső energiája függ a fal sűrűségétől ( $\rho_{fal}$ ) és térfogatától ( $V_{fal}$ ), azaz a falak tömegétől, illetve a fajhőjétől ( $c_{fal}$ ). Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy a falak külső oldalán a hőmérséklet  $T_{külső,i}$ , a falak belső oldalán a hőmérséklet  $T_{belső,i}$ , és a hőmérséklet egyenletesen változik a falakban. A ház átlagos belső energiája az  $i$ -ik napon:

$$E_{belső,i} = \rho_{levegő} \cdot V_{levegő} \cdot c_{levegő} \cdot T_{belső,i} + \rho_{fal} \cdot V_{fal} \cdot c_{fal} \cdot \frac{T_{belső,i} + T_{külső,i}}{2}. \quad (5.25)$$

## Akkumulátorok

A napelemek és a szélgenerátorok által megtermelt villamos energia egy részét az akkumulátorokban tárolhatjuk. Az  $i$ -ik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes villamos energiát  $E_{akk,i}$ -vel jelöljük. Az akkumulátorokban tárolt energia nem lehet negatív értékű, illetve nem haladhatja meg az akkumulátor-rendszer maximális tárolókapacitását [67]:

$$0 \leq E_{akk,i} \leq E_{akk\ max}. \quad (5.26)$$

A programban a virtuális akkumulátoroknak nagyon fontos szerepe volt. Az akkumulátor-rendszer energiátároló kapacitása ( $E_{akk\max}$ ) változtatható paraméter volt. Nagyrészt ennek a nagysága szabta meg, hogy a házikó energetikailag fenntartható módon működik-e.

A valóságban az akkumulátoros energiátárolással maximum a háztartás elektromos energiaszükséglete lenne reálisan biztosítható, a fűtés nem. A programban viszont szabadon adhattunk értéket a virtuális akkumulátor-rendszer maximális tárolókapacitásának, így sikerült végig fenntartani a virtuális házikó energetikai működését.

### **5.1.3. Szimuláció**

A rendelkezésre álló adatok alapján a programmal szimulálhattuk, hogy az adott napon a házikóinkban fenntartható-e a kívánt hőmérséklet, van-e elegendő villamos energiánk [B8, B9]. Természetesen előfordult, hogy egy adott napon nem termeltük meg az aznapra szükséges energiát, de ez nem baj, ha az akkumulátorokból pótolni tudjuk a hiányzó mennyiséget. Máskor viszont több energiát termeltünk, mint amennyit aznap elfogyasztottunk, így a felesleggel a virtuális akkumulátorokat tölthettük, de a modell szerint a rendszer maximális tárolókapacitását nem léphettük túl.

Ha az  $i$ -ik napon a napelemek és a szélgenerátorok által aznap megtermelt összes energia és az előző napról az akkumulátorokban megmaradt energia összege nagyobb, vagy egyenlő az aznapi teljes villamosenergia-fogyasztással, akkor az  $i$ -ik napon a virtuális házikóink energetikai szempontból fenntartható módon működik.

### Fűtési szezon

A fűtési szezonban a ház belső energiája a villanykályhával történő fűtés miatt és a környezettel való hőcsere miatt változik az  $i$ -ik napon:

$$E_{belső,i} = E_{belső,i-1} + \eta_{fűt} \cdot E_{fűt,i} + E_{hőat,i} + E_{hősug,i}. \quad (5.27)$$

Az  $i$ -ik napon a napelemek és a szélgenerátorok termel(het)nek valamennyi villamos energiát, a villamos háztartási eszközök és a villanykályhák fogyaszt(hat)nak valamennyi villamos energiát.

Ha az adott napon marad felesleges elektromos energiánk, akkor ezt eltároljuk az akkumulátorokban (ha lehetséges); azaz az  $i$ -ik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes elektromos energia a téli szezonban:

$$E_{akk,i} = E_{akk,i-1} + E_{napelem,i} + E_{szélgenerátor,i} - E_{fűt,i} - E_{villamos,i}. \quad (5.28)$$

## Hűtési szezon

A nyári szezonban a ház belső energiája a légkondicionáló berendezéssel történő hűtés miatt és a környezettel való hőcsere miatt változik az  $i$ -ik napon:

$$E_{belső,i} = E_{belső,i-1} - j_{hűt} \cdot E_{hűt,i} + E_{hőat,i} + E_{hősug,i}. \quad (5.29)$$

Az  $i$ -ik napon a napelemek és a szélgenerátorok termel(het)nek valamennyi villamos energiát, a villamos háztartási eszközök és a légkondicionáló berendezés fogyaszt(hat)nak valamennyi villamos energiát.

Ha az adott napon marad felesleges villamos energiánk, akkor ezt eltároljuk az akkumulátorokban (ha lehetséges); azaz az  $i$ -ik nap végén az akkumulátorokban tárolt összes elektromos energia a nyári szezonban:

$$E_{akk,i} = E_{akk,i-1} + E_{napelem,i} + E_{szélgenerátor,i} - E_{hűt,i} - E_{villamos,i}. \quad (5.30)$$

Az előbbi egyenletek leírják a modell házikónkat energetikai szempontból. A kérdés az, hogy reális adatokkal számolva fenntartható-e a házikó működése a 2 éves vizsgált időszakban. (A reális adatok azt jelentik, hogy a projektben résztvevő tanulók méréseiből számított átlagértékekkel és a helyi meteorológiai állomás adataival számoltunk, illetve katalógusokból kerestük ki az értékeket.)

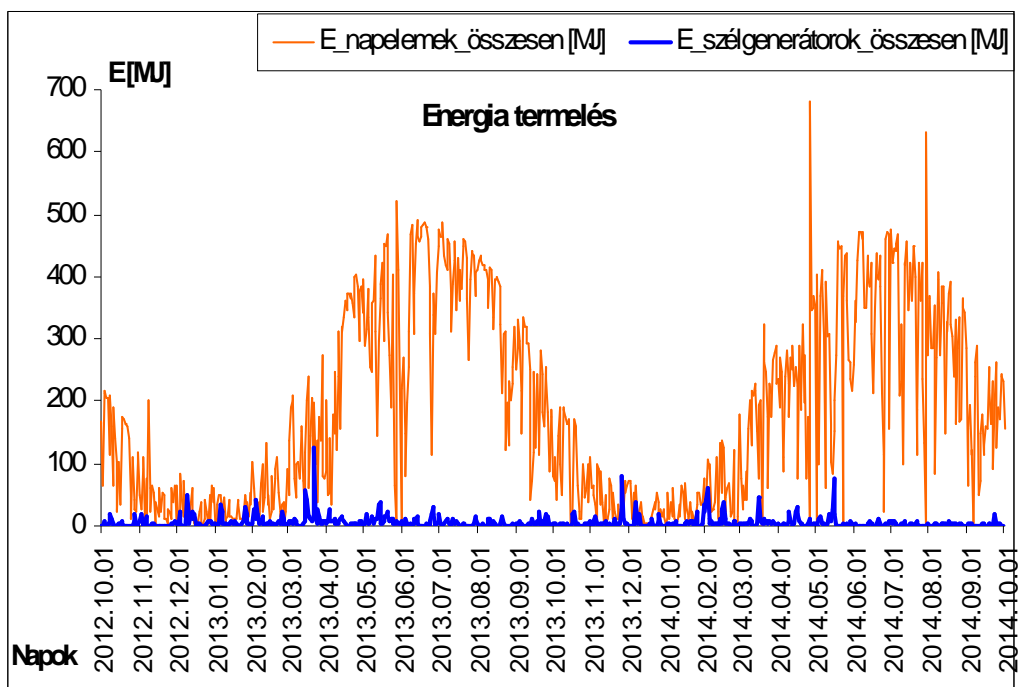
Felmerülhet az a kérdés, hogy miért naponkénti összesítéseket használtunk a modellben. Így elméletben az is előfordulhatna, hogy napközben időszakosan leállna a házikó energetikai működése, majd a nap folyamán később újraindulna. Ez akár igaz is lehetne, de nem ez a rendszer gyenge pontja. A szimulációk eredményeiből láttuk, hogy az akkumulátor-rendszer szükséges tárolókapacitása okozza a gondot. Egyébként is előfordult néhányszor a vizsgált időszakban, hogy napokig alig sütött a nap, és a szél sem fűjt; ilyenkor napokig alig volt energiatermelés. A naponkénti összesítéseknek csupán gyakorlati okai voltak. Mivel a meteorológiai állomás adatai 5 percenként frissültek, akár 5 perces időléptékkel is számolhattunk volna a modellben, csak hogy a tanulók nem tudták 5 percenként mérni a gázfogyasztásukat, a villamosenergia-fogyasztásukat, vagy az eltüzelt fa mennyiségét. (Esetleg itt számolhattunk volna arányos fogyasztási adatokkal.) A modellünkben a naponkénti összesítés véleményem szerint elfogadható kompromisszumos megoldás.

### **Kiindulási paraméterek**

A kiindulási paraméterek fontosak a szimuláció szempontjából. Ha pl. a projekt elején az akkumulátorok üresek lettek volna, és nem süt a nap, nem fúj a szél napokig, akkor a házikónk nem tudott volna működni. Ezért az első napon teljesen feltöltött akkumulátorokkal kezdtük a szimulációt. Természetesen így is leállhat a házikó működése, ha hosszú ideig nincs energia utánpótlás: ha pl. sokáig nem süt ki a nap, vagy nem fúj a szél, vagy télen nagyon hideg a ház környezete, stb.



Az 5.10. ábrán az energiatermelést láthatjuk egy konkrét szimulációban. A szimulációban 4 db szélgenerátorral számoltunk. A szélgenerátor energia átalakítását jellemző hatásfok  $\eta_{\text{szélgenerátor}}=25\%$ , a rotor felszíne  $A_{\text{rotor}}=4 \text{ m}^2$ . A napelemek energia átalakítását jellemző hatásfok  $\eta_{\text{napelem}}=15\%$ , egy napelem modul felszíne  $A_{\text{napelem}}=1 \text{ m}^2$ . (A házikó alapterülete  $100 \text{ m}^2$ , a működő napelem modulok maximális száma 100.)

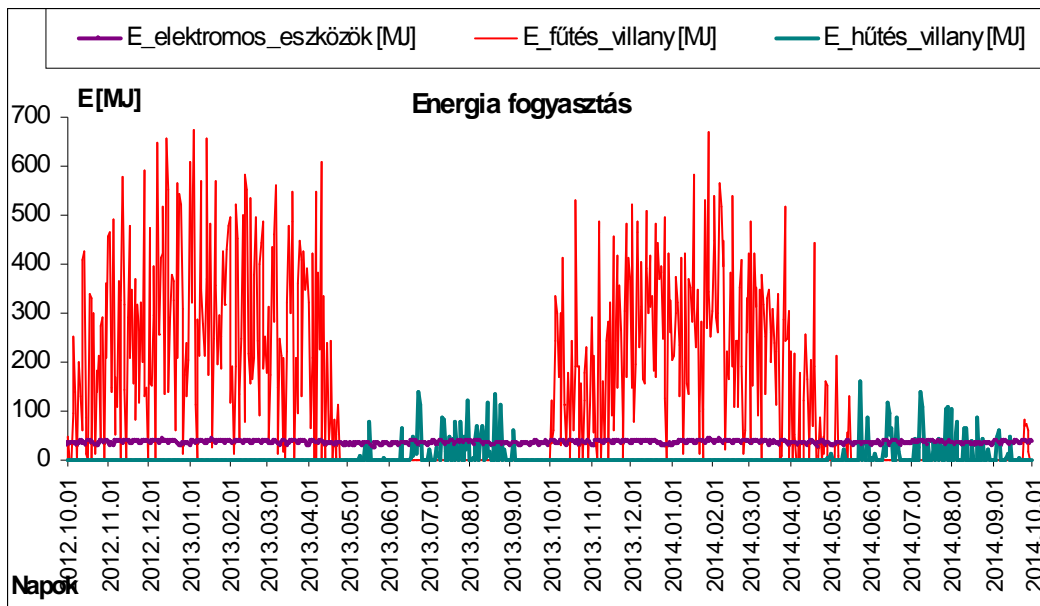


**5.10. ábra** A napelemek és szélgenerátorok által termelt villamos energia a szimuláció alapján.

Láthatjuk, hogy az energiatermelés szempontjából a napelemek a jelentősek; a 4 db szélgenerátor energiatermelése ettől általában jóval kisebb. (Előfordulhat olyan eset, hogy a szélgenerátorok több energiát termelnek, mint a napelemek, pl. egy borús, de szeles napon.) Elméletben a házikó mellett több szélgenerátort is felállíthatunk, ekkor az összesített energiatermelésük már jelentősebb lehet.

A projektünk helyszínén – Kalocsán és környékén – országos viszonylatban is nagyon magas az éves átlagos napsütéses órák száma. (Nem véletlen, hogy ez az egyik leghíresebb fűszerpaprika termesztő és feldolgozó régió, mivel a fűszerpaprikának magas a hőmérséklet- és a fényigénye is.) Nálunk a napelemes energiatermelést lehetne jobban kihasználni, a szél jelentősége viszont kisebb az energiatermelés szempontjából. Az ország különböző helyein ez természetesen változhat.

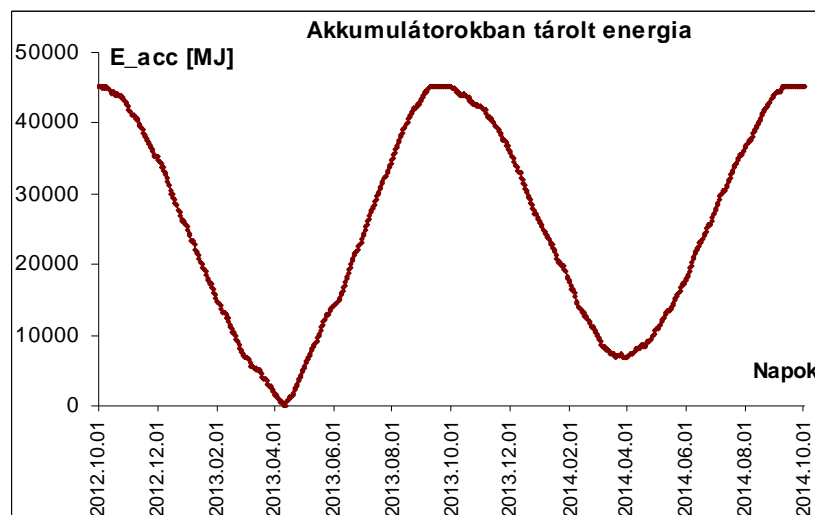
Az 5.11. ábrán az energiafogyasztást láthatjuk a szimulációban. A téglatest alakú modell házunk élhosszai  $a=10 \text{ m}$ ,  $b=10 \text{ m}$ ,  $h=3 \text{ m}$  és a falvastagság  $d=0,4 \text{ m}$ . A falak hőátbocsátási együtthatója  $k=0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , a falak emissziós tényezője  $\varepsilon=0,12$ . Az elektromos fűtés hatásfoka  $\eta_{\text{fűt}}=100\%$ , a légkondicionáló jóságai tényezője  $j_{\text{hűt}}=3$ . A levegő sűrűsége kb.  $\rho_{\text{levegő}}=1,2 \text{ kg/m}^3$  (függ a levegő paramétereitől), levegő (izokor) fajhője  $c_{\text{levegő}}=712 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , a fal átlagsűrűsége  $\rho_{\text{fal}}=1500 \text{ kg/m}^3$ , a fal anyagának átlagos fajhője  $c_{\text{fal}}=880 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .



**5.11. ábra** A ház elektromos berendezései (villanykályhák és légkondicionáló is) által elfogyasztott villamos energia 2 év alatt a szimuláció alapján.

A háztartás elektromos eszközeinek energiafogyasztása nagyjából állandónak tekinthető a teljes időszakban. A légkondicionáló berendezést csak a nyári szezonban kell időnként működtetni. A legtöbb energia a házikó villanykályhával történő fűtésére megy el a fűtési szezonban.

Ebben a szimulációban az akkumulátor-rendszer kapacitására legalább 45096 MJ értéket kellett választanunk, mert csak így lehetett a ház folytonos energetikai működését végig biztosítani. Az 5.12. ábrán az akkumulátor-rendszerben tárolt energiát láthatjuk.



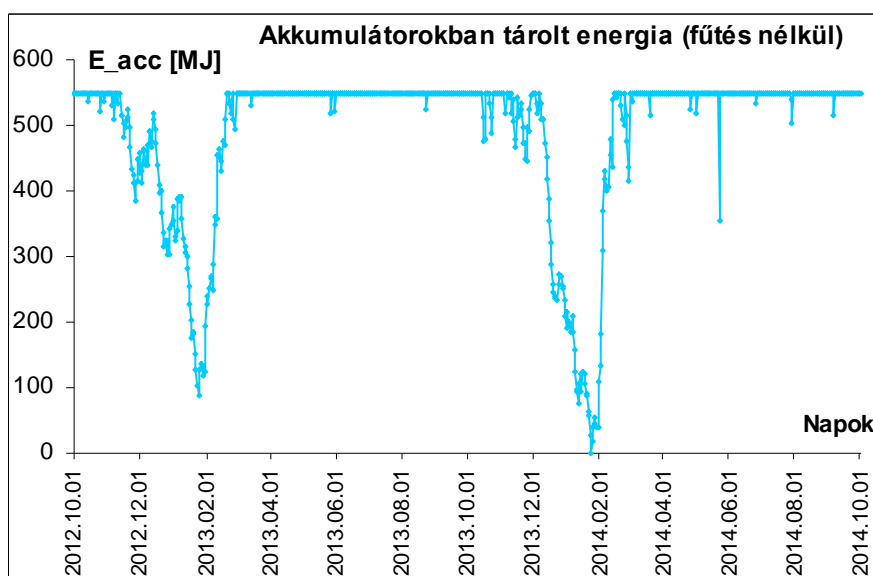
**5.12. ábra** Az akkumulátor-rendszerben tárolt energia 2 év alatt a szimuláció alapján.  
(A házat villanykályhával fűtjük.)

A szimulációt teljesen feltöltött akkumulátorokkal kezdtük. Az őszi és a téli szezonban termeltünk ugyan valamennyi villamos energiát, de nagyrészt az akkumulátorokról táplált villanykályhák segítségével tudtuk a ház fűtését megoldani. A tél végére szinte teljesen lemerültek az akkumulátorok.

A tavasz és a nyár folyamán a felesleges villamos energiával az akkumulátorokat feltöltöttük, és a következő ősztől kezdve nagyjából hasonló módon ismétlődött a folyamat. A szimulációban a virtuális akkumulátor-rendszerünk szükséges tárolókapacitására olyan nagy érték jött ki, hogy ez is megerősíti azt a korábbi feltevésünket, hogy a téli fűtéshez szükséges villamos energiát a valóságban nem lehet így tárolni [B8].

A következő ötletünk az volt, hogy a villanykályhák helyett hőpumpával fűtjük a házat. Ez is elektromos energiát fogyaszt, de a felhasznált villamos energia többszörösét is képes lehet hő formájában átszállítani [49]. A legmodernebb hőpumpák jóságai tényezője 4,9 körül van [80]. Ezzel az értékkel is lefuttatunk egy szimulációt, így 6969 MJ tárolókapacitású akkumulátor-rendszerre volt szükség a folytonos működéshez. Sajnos még ez is túl nagy érték a gyakorlati megvalósítás tekintetében.

Ha kicsit realisabban gondolkodunk és lemondunk a ház villamos fűtéséről (pl. fával fűtünk), akkor a szimuláció szerint 548 MJ akkumulátor kapacitás elegendő volt a ház folytonos működésének biztosításához [B9]. (Ez is jelentős energiatárolási kapacitást jelent, de ez esetleg a valóságban kivitelezhető lenne, bár nagyon sokba kerülne.) Ekkora akkumulátor kapacitásra volt szükség a különböző elektromos berendezések és a légkondicionáló működtetéséhez. Az 5.13. ábrán az akkumulátor-rendszerben tárolt energiát láthatjuk.



**5.13. ábra** Az akkumulátor-rendszerben tárolt energia 2 év alatt a szimuláció alapján.  
(A ház fűtéséhez nem használunk elektromos energiát.)

Megfigyelhetjük, hogy a vizsgált időszak nagyobbik felében bőven elegendő az akkumulátor-rendszerben tárolt energia a ház elektromos eszközeinek működtetéséhez. A két tél folyamán azonban a napelemek és a szélgenerátorok energiatermelése nagyon lecsökken, ezért a decembertől februárig tartó időszakokban csak úgy tudjuk működtetni az elektromos eszközeinket, hogy a korábban feltöltött akkumulátorokból nyerjük az energiát. (Ha ez a házikó egy nyaraló lenne, ahová télen nem megyünk, akkor sokkal kisebb akkumulátor kapacitással is megoldhatnánk tavasztól őszig a ház elektromos eszközeinek működtetését.)

A nyár folyamán néha látható egy-egy hirtelen energiaszint csökkenés. Ezek általában akkor fordulnak elő, ha nagyon meleg van, ezért a légkondicionálót működtetnünk kell, viszont esetleg nincs szél, illetve mondjuk felhős az ég, és a napelemek nem termelnek elegendő elektromos energiát.

### **Költségek becslése**

A tanulókkal megvizsgáltuk, hogy milyen összegű beruházásra lenne szükség egy ilyen ház energetikai fenntarthatóságának biztosításához [B8]. A napelem rendszer kiépítése nagyjából 3-6 millió Ft-ba kerülne. (A napelemeket várhatóan kb. 25-30 évente ki kell cserélni.)

Megnéztük hogy, hány darab akkumulátorra lenne szükségünk, és mennyibe kerülne ez a módszer? Az egyszerűség kedvéért a bonyolult technikai részletektől eltekintünk. Elegendő, ha a költségeket megbecsüljük. Egy gépkocsikban használatos, 12 V-os, jó minőségű, savas ólomakkumulátorban kb. 2,5 MJ elektromos energiát lehet tárolni. Egy ilyen akkumulátor ára kb. 25000 Ft. Ezek alapján az 548 MJ energiamennyiség tárolásához szükséges rendszer kialakításához legalább 220 db ólomakkumulátorra lenne szükségünk, ezek ára kb. 5,5 millió Ft lenne. Az elektromos és a hibridüzemű gépkocsikban használatos lítiumion akkumulátorokból kevesebb darabra lenne szükségünk, viszont a rendszer kiépítésének ára még ettől is jóval magasabb lenne. Láthatjuk, hogy a költségek is nagyon magasak és ennyi akkumulátor tárolása, kezelése is nagyon nehéz feladat lenne.

Az akkumulátorok nem környezetbarát eszközök, és nem végtelen az élettartamuk. Milyen hulladékok származnak ezekből? Milyen mértékben lehet az anyagokat újrahasznosítani? Ezek fontos kérdések lehetnek, ha ilyen házak nagy számban elterjednének. A projektben ezen összefüggésekről is esett szó.

Látható, hogy a ház fűtéséhez kell a legtöbb energia. Az adatok láttán a tanulók egy része úgy vélekedett, hogy kénytelenek leszünk a fűtési feladatot másokra bízni: a gázszolgáltatótól kell földgázt venni, vagy másoktól kell szén, fát vásárolni, stb. A tanulók másik részének nem tetszett ez a megoldás, mert így másokra lennénk ráutalva. A következő ötletek merültek fel.

1., Az egyik javaslat alapja az volt, hogy egy falusi házhoz általában tartozik valamekkora kert is, ezek területe néhány ha (hektár) szokott lenni (1 ha=10000 m<sup>2</sup>, kb. ekkora egy futballpálya területe). A becsléseink szerint, ha ebből a területből kb. 0,4 ha területen erdőt telepítenénk, akkor az itt megtermelt famennyiséget használhatnánk a ház fűtésére. Jó választásnak tűnik például az akác, mert ez viszonylag gyorsan nő, nem igényel jó termőtalajt (még a homokon is nő), és elég magas a fűtőértéke (kb. 14,8 MJ/kg). A számításaink szerint ekkora területen elférne egy kb. 500 fából álló erdőcske. (1 db akácfa csemete ára kb. 10 Ft.) A telepítés után kb. 25-30 évvel már vágásérettek lennének a fák, persze nem vágnánk ki az egészet egyszerre. Egy átlagos fűtési szezonban egy átlagos, hőszigetelt családi ház (teljes fűtésére elegendő lenne kb. 5 tonna akácfa. (Ezt saját tapasztalataink alapján mondhatjuk.)

Ez mérettől függően kb. 15-20 db vágásérett fa kivágását jelentené évente. Az akácot nem is kellene újratelepíteni, mert gyakorlatilag a gyökérről újra kinőne. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy, ha most telepítenénk egy kb. 0,4 hektáros akácerdőt, akkor 25-30 év múlva ez az erdőcske folyamatosan biztosítaná a családi ház fűtéséhez szükséges famennyiséget, az ezután következő időszakban évről évre. A módszerrel önfenntartók lehetnénk, azaz nem függnénk másoktól. A városokban élők valószínűleg nem élnek az erdőtelepítés lehetőségével, de egyébként falun teljesen kivitelezhető lenne a javaslat. A fa elégetésekor annyi széndioxid kerülne a levegőbe, amennyit a fa a növekedése során a levegőből felhasznált; összességében nem növelnék a légkör széndioxid tartalmát, ezért nem növelnék az üvegház-hatást.

2., A másik javaslatnak az volt a lényege, hogy a házunk tetejét, a garázst stb. végig napelemekkel fedjük be, és a ház körül annyi szélgenerátort felállítunk, amennyit csak lehetséges. A megtermelt villamos energia egy részét felhasználjuk a napi működés során, de a maradékot vízbontásra használjuk. A tartályokban tárolt hidrogén lesz a szekunder energiaforrásunk. Tehát tavasztól ősziig előállítjuk azt a hidrogént, ami majd téli energiaszükségleteinket is fedezi. Elméletben ez a megoldás is működhet, de ennek a technikai kivitelezése sokkal bonyolultabb, ráadásul nagyságrendekkel több kerülne, mint egy 0,4 hektáros erdő telepítése. Az is igaz, hogy ennél a módszernél nem kellene 25-30 évet várnunk a fák növekedésére.

3., Egyszerűbb a helyzet, ha a ház hozzákapcsolódik a kereskedelmi villamos hálózathoz és az elektromos szolgáltató megveszi tőlünk a felesleges villamos energiát, és szükség esetén nem sokkal drágábban vásárolhatunk a szolgáltatótól elektromos energiát. (Itt szükség lehet két irányban mérő villanyóra is.) Ekkor nekünk gyakorlatilag nem kell gondoskodnunk az energia tárolásáról. A módszer hátránya, hogy feltétlenül hozzá kell kapcsolódnunk a szolgáltató távvezeték rendszeréhez, azaz szigetüzemű működésnél ez a megoldás nem jöhet szóba. Másik hátrány, hogy a szolgáltató nem biztos, hogy átveszi tőlünk a felesleget, illetve kérdés, hogy milyen áron. Ennél a módszernél tehát mindenképpen függünk a szolgáltatótól, viszont megspórolhatjuk az energiatároló-rendszer kiépítésének és működtetésének költségeit. (Az egyszerűsített modellünkben viszont egy különálló ház energetikai folyamatait vizsgáltuk.)

## **5.2. Az óraátállítás hatásainak vizsgálata**

Az energetikai projektben megvizsgáltuk az óraátállítás energetikai hatásait is [B10]. A XX. században hazánkban többször bevezették, majd beszüntették az óraátállítást; 1980 óta folyamatosan érvényben van az óraátállítás, azaz minden évben kétszer át kell állítani az óráinkat. Március utolsó vasárnapján az óráinkat 1 órával előbbre állítjuk, ezt nevezzük nyári időszámításnak; október utolsó vasárnapján az óráinkat 1 órával visszaállítjuk, ez a téli időszámítás.

Az Európai Unió tagállamaiban 1996 óta egységes az órák átállítása. Az EU-n kívül vannak olyan országok, ahol soha nem alkalmazták az óráátállítást. Vannak olyan országok, ahol régebben alkalmazták, de most már nem, illetve vannak olyan országok is, ahol jelenleg alkalmazzák. Azokban az országokban, ahol alkalmazzák az óráátállítást, ott a nyári időszámítás 6 hónapig, vagy 7 hónapig, esetleg 8 hónapig tart, ez függ az adott országtól.

### **Miért vezették be az óráátállítást?**

Az órák átállításának ötletét Benjamin Franklin javasolta 1784-ben. E szerint tavasszal előrébb kellene állítani az órákat, ősszel pedig vissza, mert így a világításhoz használt gyertyákkal takarékoskodni lehetne; de az ötletét annak idején nem fogadták el [81].

A nyári időszámítás tényleges bevezetése, az órák országos szintű átállítása 1916-ban Németországban történt meg elsőként, mert az I. világháború alatt ezzel üzemanyagot lehetett hadi célokra megtakarítani. Ezután több ország is bevezette az óráátállítást, hasonló indokokból. Az I. világháború utáni békeidőszakban a legtöbb ország felhagyott a kétféle időszámítás használatával. A II. világháború idején újra alkalmazták a nyári időszámítást. A II. világháború után egyes országokban alkalmazták, másokban viszont nem [81, 82].

A nyári időszámítás alkalmazásának manapság az a legfőbb indoka, hogy így villamos energiát lehet megtakarítani [82]. Az emberek tavasztól őszig 1 órával többet tartozódhatnak a szabadban, ezért otthon 1 órával kevesebb ideig használják az elektromos berendezéseiket. Ez elméletben még igaz is lehet, de, hogy a valóságban így van-e, azt sokan vitatják.

### **Az óráátállítás negatív hatásai**

Elméletben tehát villamos energiát takaríthatunk meg a kétféle időszámítás alkalmazásával. Ne feledkezzünk meg arról, hogy az órák átállításának azonban negatív következményei is vannak! Néhány példa erre [82]:

- Évente kétszer át kell állítani az órák legnagyobb részét, mert ezek nem állnak át automatikusan.
- Az óráátállítások után az emberek többségének akár 1-2 hétbe is beletelik, mire hozzászokik az új időszámításhoz. Az órák átállítását nem követi automatikusan az ember biológiai órájának átállása. Ebben az időszakban előfordulhat rossz közérzet, alvászavar, koncentrációs problémák, ingerültség, és akár depresszió is felléphet.
- Statisztikák szerint az óráátállítások utáni néhány napban a közúti balesetek száma megemelkedik.

Láthatjuk, hogy az óráátállításnak bizony negatív következményei is vannak. Érdeemes elgondolkodni, hogy az energia megtakarítása kompenzálja-e a negatív hatásokat.

A tavaszi és az őszi óráátállítás időszakában gyakran sajtóközlemények jelennek meg arról, hogy az óráátállításra a villamos-energia megtakarítás miatt van szükség. 2014-ben a tavaszi

óraátállítás után megkérdeztem a tanulókat, hogy nekik mi a véleményük az óraátállítás villamosenergia-fogyasztásra gyakorolt hatásáról. A tanulóknak a válaszaikat indokolniuk kellett. A viták után 3 csoport alakult ki a tanulók között, nagyjából egyenlő arányban:

- A tanulók egy része gyakorlatilag kész tényként kezelte, hogy az óraátállításra a villamosenergia megtakarítása miatt van szükség, hiszen a szakemberek ezt állítják. *„Miért állítanák a szakemberek, ha ez nem lenne igaz? Ha nem lenne igaz, akkor nem is alkalmaznák az óraátállítást olyan sok országban.”*
- A tanulók másik része viszont kategorikusan kijelentette, hogy nem hisz abban, hogy az óraátállítással villamos energiát lehetne megtakarítani, ezért az egész óraátállítást teljesen feleslegesnek tartja. *„Az óraátállítás miatti villamos-energia megtakarítás csak egy mítosz. Ha igaz, akkor miért nem alkalmazzák egységesen a világ összes országában?”*
- A tanulók 3. csoportja úgy gondolta, hogy ez egy eldönthetetlen kérdés. Véleményük szerint nincs olyan módszer, amivel ezt meg lehetne mérni.

Az egyes csoportok között éles vita alakult ki. Ha a tanítási-tanulási folyamatában olyan témáról van szó, amely a tanulók érzelmeire is hat, akkor általában motiváltabban foglalkoznak a tanulók azzal a témával. Ebben az esetben is ez történt. A viták elég szenvedélyesek voltak, de sikerült értelmesen megvitatni a témát, azaz a racionális meggyőzésre törekedtünk. A projektben a tanulók vitakultúrája sokat fejlődött, és megtanulták meghallgatni mások véleményét.

A projekt elején tehát 2 ellentétes álláspont körvonalazódott az óraátállítás energetikai hasznosságát illetően, illetve a 3. csoport szerint ezt a kérdést nem lehet eldönteni. A nézőpontok ütköztetése érdekében vitacsoportokat alakítottunk. Egy-egy csoport feladata az volt, hogy mutassák be a saját nézőpontjukat, tudományos érvekkel támasszák alá az elképzelésüket, majd próbálják meggyőzni a másik csoportok tagjait az érveik segítségével. Természetesen a többiek nem voltak kötelesek elfogadni a másik csoport nézőpontját: hibákat, félreértelmezéseket, stb. kereshettek a vitapartnerek gondolatmenetében. A tapasztalataim szerint a projekt módszer kiválóan alkalmas a tanulók vitakultúrájának fejlesztésére, ezáltal is bővíti a tanulók kompetenciáit.

A viták alapján látszott, hogy érdemes részletesebben is végiggondolnunk az óraátállítást. Először feltettem a kérdést, hogyan lehetne az óraátállítás következtében jelentkező villamosenergia-fogyasztás változását megmérni? Két elméleti mérési ötlet fogalmazódott meg.

- 1. módszer: Lehetne például úgy mérni, hogy országosan páros években alkalmazzuk az óraátállítást, páratlan években nem (vagy fordítva), és így hasonlíthatnánk össze a páros, illetve páratlan évek hosszabb (évtizedes) távú villamosenergia-fogyasztás átlagait, hogy az időbeli egyenetlenségek kiegyenlítődjenek. Az átlagolások alapján eldönthetnénk, hogy van-e tényleges villamos-energia megtakarítás az óraátállítási években.

- 2. módszer: Egy másik elméleti mérési eljárás lehetne, hogy évenként véletlenszerű választással a megyék felében bevezetnénk az óraátállítást (hogy a területi különbségek is kiegyenlítődjenek), a megyék másik felében nem, majd meghatároznánk az egy főre jutó átlagos éves villamosenergia-fogyasztást, az óraátállítós, illetve a nem óraátállítós megyékben, majd összehasonlítanánk az eredményeket. Azért az egy főre jutó adatok kellene, mert a megyék lakossága és fogyasztása különböző. A következő évben újrasorsolnánk a megyéket és megint hasonlóképpen mérnénk (A villamosenergia-fogyasztásokat fogyasztási helyenként egyedileg mérjük, majd megyei szinten összesítjük.) Az átlagolás alapján eldönthetnénk, hogy van-e tényleges villamos-energia megtakarítás az óraátállítós megyékben az egy főre jutó villamosenergia-fogyasztást tekintve.

Mindenki sejti, hogy ez a fajta megyeszintűen megosztott óraátállítás a gyakorlatban szinte kivitelezhetetlen lenne, a végén kaotikus állapot alakulna ki. Gondoljunk például a tömegközlekedésre! Bármennyire abszurdnak tűnik, mégis valami hasonló történt az USA-ban: 1945 és 1966 között az egyes államok szabadon dönthettek, hogy alkalmazzák-e az óraátállítást vagy sem, illetve, hogy konkrétan mikor és mennyivel állítgatják az óráikat. Végezetül tényleg káosz alakult ki, ezért 1966-ban az USA-ban törvényben szabályozták a nyári időszámítás alkalmazását [82].

Összességében tehát arra a következtetésre jutottunk, hogy országos szinten a villamosenergia-fogyasztás óraátállítás miatti változását maximum csak becsülni lehet.

### **A hazai villamosenergia-fogyasztás**

Mivel az óraátállítással kapcsolatos villamos-energia megtakarításról tényleges mért adatok nincsenek, ezért a következő egyszerű módszert néztük meg a tanulókkal a vita eldöntésére.

A Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító (MAVIR) ZRt. a honlapján közzéteszi a magyar országos összesített villamosenergia-fogyasztás napi statisztikai adatait 2009. január 1-től kezdődően [83]. (A korábbi időszakról nincsenek részletes adatok a honlapon.) Megvizsgáltuk öt és fél év adatai alapján a tavaszi és az őszi óraátállítást megelőző és az azt követő időszak villamosenergia-fogyasztásának változásait. Összességében 6 db tavaszi és 5 db őszi óraátállításhoz tartozó villamosenergia-fogyasztási adathalmazt vizsgáltunk.

Meghatároztuk a hetek egyes napjaira jutó átlagfogyasztásokat és a szórásokat a teljes vizsgált időszakban. Az adatok az 5.2. számú táblázatban találhatóak.

A hétköznapokra számított átlagfogyasztás 119,59 GWh/nap (a szórás 8,16 GWh/nap), a hétvégékre számított átlagfogyasztás 107,08 GWh/nap (a szórás 7,55 GWh/nap). Hétköznapokon az országos villamosenergia-fogyasztás átlagértéke meghaladja a hétvégéken mérhető átlagfogyasztást. Ez nem meglepő, hiszen a termelő üzemek egy része a hétvégéken leáll, alig fogyaszt villamos energiát.



**5.2. táblázat** A hét egyes napjain az országos átlagos villamosenergia-fogyasztás és a szórása  
2009.01.01. és 2014.05.11. között.

Hét napjai	Villamosenergia-fogyasztás átlaga [GWh/nap]	Villamosenergia-fogyasztás szórása [GWh/nap]
hétfő	116,74	9,11
kedd	120,09	7,95
szerda	120,82	7,43
csütörtök	120,85	7,60
péntek	119,45	7,97
szombat	109,82	7,04
vasárnap	104,35	7,04

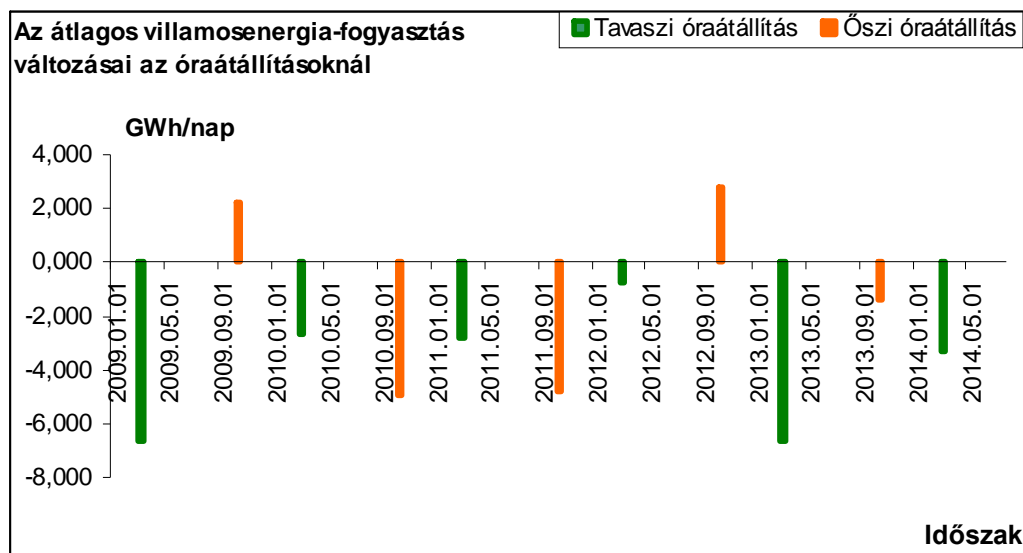
### A villamosenergia-fogyasztási adatok elemzése

Többféle összehasonlító elemzést végeztünk [B10]. A dolgozatban csak a legegyszerűbb módszert mutatom be. A tavaszi óráátállítások napját megelőző 7 napban (vasárnaptól szombatig) meghatároztuk az egy heti országos átlagos villamosenergia-fogyasztást, majd az óráátállítások napját követő 7 napban (hétfőtől vasárnapig) szintén meghatároztuk az egy heti országos átlagos villamosenergia-fogyasztást. Az őszi óráátállítások napját megelőző 7 napban (vasárnaptól szombatig) is meghatároztuk az egy heti országos átlagos villamosenergia-fogyasztást, majd az óráátállítások napját követő 7 napban (hétfőtől vasárnapig) szintén meghatároztuk az egy heti országos átlagos villamosenergia-fogyasztást. Az óráátállítások napjait nem vizsgáltuk, mert ezeken a vasárnapokon részben a téli, részben a nyári időszámítás volt vegyesen érvényben.

A vizsgálatainkhoz azért választottunk 7 napot, mert ebben a teljes hét reprezentálva van; hiszen hétköznapokon, illetve hétvégén eltérnek a villamosenergia-fogyasztási szokások. Azért csak egy-egy hetes időszakot vizsgáltunk, mert azt feltételeztük, hogy így valószínűleg még nincsenek nagyon nagy különbségek az időszakon belül a világos nappali órák számában, illetve az időjárási viszonyok is nagyrészt hasonlóak lehetnek.

Összehasonlítottuk a 6 db tavaszi és az 5 db őszi óráátállítás előtti 7 nap és az óráátállítások utáni 7 nap országos átlagos villamosenergia-fogyasztásait. Ha elfogadjuk, hogy az adott két hetes időszakokban nagyjából egyforma az időjárás és az óráátállítást követő héten kisebb az átlagos napi villamosenergia-fogyasztás, mint a megelőző héten, akkor ez azt jelzi, hogy valószínűleg tényleg energiát takaríthatunk meg az órák átállításával. Természetesen ez akkor igaz (idealizált esetben), ha a tavaszi és az őszi óráátállításkor is csökken a napi átlagos villamosenergia-fogyasztás az egy-egy hetes időszak átlagában. Hiszen elméletben pont azért állítgatjuk az óráinkat előre, majd vissza, mert így lesz kedvezőbb a villamosenergia-fogyasztásunk. (Tehát elméletben minden óráátállításkor csökkenést kellene tapasztalnunk ideális esetben.)

Az 5.14. ábrán ábrázoltuk a 2009.01.01. és 2014.05.11. közötti időszakban a tavaszi és őszi óraátállítások előtti héten és az óraátállítások utáni héten mérhető átlagos villamosenergia-fogyasztás megváltozásait.



**5.14. ábra** A tavaszi és az őszi óraátállítások előtti és utáni hét átlagos napi villamosenergia-fogyasztásainak változásai.

A tavaszi óraátállításokat és az őszi óraátállításokat célszerű külön vizsgálni. A vizsgált időszakban a tavaszi óraátállításokat követő héten minden alkalommal csökkent a villamosenergia-fogyasztás, átlagosan 3,81 GWh/nap értékkel (a szórás 2,37 GWh/nap). Az őszi óraátállításokat követő héten 3 alkalommal csökkent és kétszer növekedett a villamosenergia-fogyasztás, ez átlagban 1,24 GWh/nap fogyasztáscsökkenésnek felelne meg, de a szórás ennél nagyobb, ezért itt nem tehetünk határozott kijelentést.

Ezután a tanulókkal összehasonlítottuk az óraátállításokat megelőző 2 hét országos átlagos villamosenergia-fogyasztásait, illetve az óraátállításokat követő 2 hét országos átlagos villamosenergia-fogyasztásait, minden évre. A vizsgált időszakban a tavaszi óraátállításokat követő 2 héten minden alkalommal csökkent a villamosenergia-fogyasztás, átlagosan 4,22 GWh/nap értékkel (a szórás 3,26 GWh/nap).

Ezt követően összehasonlítottuk az óraátállításokat megelőző 3 hét országos átlagos villamosenergia-fogyasztásait, illetve az óraátállításokat követő 3 hét országos átlagos villamosenergia-fogyasztásait, minden évre. A vizsgált időszakban a tavaszi óraátállításokat követő 3 héten minden alkalommal csökkent a villamosenergia-fogyasztás, átlagosan 5,88 GWh/nap értékkel (a szórás 2,96 GWh/nap).

Végezetül a 4 hetes átlagolásokat hasonlítottuk össze. A vizsgált időszakban a tavaszi óraátállításokat követő 4 héten minden alkalommal csökkent a villamosenergia-fogyasztás, átlagosan 7,14 GWh/nap értékkel (a szórás 2,39 GWh/nap).

A tavaszi óraátállításoknál az óraátállítás után csökkenés figyelhető meg az országos villamosenergia-fogyasztásban. (Az őszi óraátállításoknál a szórás nagysága miatt ilyen kijelentést nem tehetünk.) A tavaszi villamosenergia-fogyasztáscsökkenés nem kimondottan csak az óraátállítás miatt jelentkezik, hiszen a nappali világos órák száma is növekedett és valószínűleg az időjárás is javult, és a fogyasztáscsökkenést részben ezek a hatások okozták.

Az adatok elemzéséből láttuk, hogy a jelentősebb változások az óraátállítások környékén történtek. Külön az óraátállítások előtti időszakokban a változások, illetve külön az óraátállítások utáni időszakokban a változások jóval kisebbek az óraátállításoknál mérhető változásokhoz képest. (Természetesen itt is vannak fluktuációk, de több hetes bontásokban vizsgálva láttuk, hogy az óraátállításoknál van jelentős változás a villamosenergia-fogyasztási átlagértékekben.)

A tanulókkal megpróbáltuk megbecsülni az adatok alapján, hogy országosan mennyi lehet az óraátállítások miatt jelentkező átlagos villamos-energia megtakarítás. A táblázatkezelő program segítségével statisztikai elemzéseket végeztünk. Különböző összehasonlításokat végeztünk, ennek részleteit korábban már bemutattam [B10]. A becsléseink alapján azt kaptuk, hogy nagyságrendileg kerekítve 100 GWh lehet országosan az óraátállítások miatt megtakarított villamos energia éves szinten. Hazánk átlagos éves villamosenergia-fogyasztása kb. 42-44 TWh; a becslések alapján úgy gondoljuk, hogy az óraátállításokkal az éves átlagos fogyasztásnak kb. 0,25%-át lehet megtakarítani.

A becslések pontosságát fokozni lehetne, ha pl. még több évet vizsgálnánk, az időjárási adatokat és a tényleges napi világos órák számát is figyelembe vennénk, illetve figyelembe vennénk, hogy mikor esnek ünnepnapok hétköznapra, vagy mikor vannak szombati munkanapok, stb. Ez azonban már nagyon komplikált lenne. A projektben megelégedtünk a nagyságrendi becsléssel.

A MAVIR ZRt. szakemberei szerint Magyarországon éves szinten kb. 120 GWh elektromos energiát takarítunk meg az óraátállításnak köszönhetően. Ez kb. 40 ezer háztartás átlagos villamosenergia-fogyasztásának felel meg, vagy országos viszonylatban hazánk egy napi átlagos villamosenergia-fogyasztásának [83].

Ha kimondottan az energiafogyasztás csökkentése a cél, akkor az óraátállításnak statisztikai értelemben tényleg van ilyen hatása. Korábban valószínűleg még hatékonyabb energiafogyasztást csökkentő módszer lehetett az óraátállítás, de a megváltozott gazdasági és szociális helyzetben a megváltozott energiafogyasztási szokások miatt manapság már kevésbé tűnik hatásosnak.

## 6. Színes kaméleonok fázisátalakulása

Az ELTE Fizika Tanítása Doktori Program szervezésében Dr. Néda Zoltán professzor úr tartott egy előadás sorozatot, ahol különböző rendszerekben előforduló kollektív viselkedésekről esett szó [84]. Az előadás sorozat végén a professzor úr javasolta, hogy találjunk ki olyan játékos feladatot, amelyben valamilyen kollektív viselkedés szerepel, és akár egy középiskolás diák figyelmét is felkelthetjük vele. Ebben a fejezetben egy játékos szimulációs modellt mutatok be, ami a kollektív jelenségek közül a fázisátalakuláshoz kapcsolódik [B11]. A feladatot projektmunkában dolgoztuk ki a tanulókkal.

A sok egyedből álló rendszerekben olyan jelenségek is előfordulhatnak, melyek nem direkt módon következnek a rendszert alkotó egyedek egyéni tulajdonságaiból. A jelenségeket összefoglaló néven kollektív viselkedésnek nevezzük. A fázisátalakulás, a szinkronizáció, rajzás, lavinák kialakulása, vagy a térbeli mintázatképződés olyan kollektív jelenségek, melyek nemtriviális módon jelennek meg az adott rendszerben [84]. Ezek a jelenségek olyan rendszerekben fordulhatnak elő, amelyekben általában nagyszámú egyed található, és az egyedek között valamilyen kölcsönhatás van [85].

A fázisátalakulás során a rendszer fizikai tulajdonságai ugrásszerűen megváltoznak; bizonyos feltételek mellett a rendezetlen állapotból rend lesz, vagy fordítva. Nézzünk néhány fázisátalakulást, amelyek során a rendezetlen állapotból rendezett állapot lesz [76, 77, 84, 85]!

- **Fagyás:** tiszta anyagok hűtése esetén folyadék halmazállapotból egy adott hőmérsékleten (a fagyásponton) szilárd halmazállapotú (kristályos) anyag keletkezik.
- **Szupravezetés:** néhány tiszta anyagnak, ötvözetnek és kerámiának hűtés közben egy adott kritikus (átmeneti) hőmérsékleten szinte mérhetetlenül kicsivé válik az elektromos ellenállása. Ez a kritikus hőmérséklet általában az abszolút zéruspont közelében van, bár például a magas hőmérsékletű szupravezető kerámiák kivételek.
- **Ferromágneses rend kialakulása:** bizonyos tiszta paramágneses anyagok, és néhány ötvözet is hűtés közben egy adott hőmérsékleten (a Curie-ponton) ferromágnessé válik.

Az előző példákban a rendezetlen állapotban lévő rendszerekben egy adott paraméter ún. kritikus értékénél hirtelen rend alakult ki. Tudjuk jól, hogy a rendezetlenségből nehéz rendet teremteni. Fordítva megy magától is. A termodinamika II. főtétele szerint a zárt, izolált rendszer entrópiája egyensúlyi állapotban maximális. Az entrópia a rendszer rendezetlenségének mértéke [76, 84, 85].

A rendszer fázisátalakulását középiskolai tanulókkal is tanulmányozhatjuk. A bemutatásra kerülő modellben bizonyos paraméterértékeknél a rendezetlenségből hirtelen rend alakul ki.

## 6.1. Kaméleonos feladat

A fázisátalakulási jelenségek iskolai bemutatására kitaláltam egy játékos programot. A számítógépes szimulációt a fizika és az informatika iránt érdeklődő 11. és 12. évfolyamos diákokkal közösen fejlesztettem ki projektmunkában [B11]. (A szimulációs feladatot FreePascal programozási nyelven írtuk meg, mert az iskolánkban a tanulók ezt a programnyelvet tanulják. A projektben résztvevő tanulóknak én tanítottam a fizika és az informatika tantárgyat is.)

A szimulációs feladat kaméleonokról szól, melyek bizonyos esetekben különleges módon viselkedhetnek. A játékos megfogalmazás ellenére a feladat tulajdonképpen fizikai folyamatot modellez. Több kaméleonos feladatot is megvalósítottunk; a bemutatásra kerülő modellben a kaméleonok egyszerű módon képesek szimulálni a rendszer fázisátalakulását.

Egy globálisan kölcsönható rendszerben minden egyed hatással van minden másik egyedre; egy lokális rendszerben az egyes egyedek csak a velük kölcsönható szomszédos egyedektől függenek, nem pedig az egész rendszertől [84]. A lokális rendszerek viselkedése a bonyolultabb. A bemutatásra kerülő modellben a kaméleonjaink egy kvázi lokális rendszert alkotnak, mivel csak a szűkebb környezetüket érzékelik.

### A feladat megfogalmazása

Képzeljük el, hogy van egy téglalap alakú terráriumunk, melyben kaméleonok vannak. A kaméleonok összesen  $s$  db ( $s > 1$ ) szín közül tetszőleges színt fel tudnak venni. (Az  $s$  paraméter értékét mi adhatjuk meg.) Jelöljük a kaméleonok lehetséges színeit  $szín_1, szín_2, \dots, szín_s$  paraméterekkel!

A program indulásakor megadjuk az adott színű kaméleonok kezdeti számát. Jelölje az  $i=0$ -ik időpillanatban (a kezdeti állapotban) a  $szín_1$  színű kaméleonok számát  $N_{0,szín1}$ , a kezdetben  $szín_2$  színű kaméleonok számát  $N_{0,szín2}, \dots$ , a kezdetben  $szín_s$  színű kaméleonok számát  $N_{0,szín_s}$ ! A terráriumban a kaméleonok összes darabszáma  $N = N_{0,szín1} + N_{0,szín2} + \dots + N_{0,szín_s}$ . (Az  $N$  értéke egy adott szimulációban állandó.)

### A terrárium

Ha megadtuk a különböző színű kaméleonok kezdeti számát, akkor a program a grafikus képernyőn elosztja az  $N$  db kaméleont a terráriumon belül. Mindegyik kaméleonnak van egy indexszáma (1-től  $N$ -ig számozva), ez alapján tudjuk a szimuláció során az egyes kaméleonokat nyomon követni. (A kaméleonok egyébként azonos kinézetűek, legfeljebb csak a színükben különböznek.)

A kaméleonok kezdetben véletlenszerűen helyezkednek el a terráriumban. A terráriumot a számítógépes programban egy téglalap jelképezi, a különböző színű kaméleonokat pedig egy-egy  $r$  sugarú, megfelelő színű kör. A kaméleonok elhelyezkedését derékszögű koordinátarendszerben tartjuk nyilván.

## A kaméleonok mozgása

A kaméleonok mozognak a terráriumban. Az egyes kaméleonok sebességének iránya kezdetben véletlenszerű értékű; a kaméleonok sebességének nagysága a szimuláció indulásakor szintén véletlenszerű érték lehet.

### A hőmérséklet

A terráriumon belül az abszolút hőmérsékletet szabályozni lehet, természetesen a hőmérséklet állandó értékű is lehet. A számítógépes program indulásakor beállítjuk a terrárium kezdeti hőmérsékletét ( $T_0$ ). A különleges kaméleonok elvileg bármekkora abszolút hőmérsékletet kibírnak; és a kaméleonok mozgása függ a terrárium hőmérsékletétől is.

Ha a hőmérséklet növekszik, akkor a kaméleonok nagyobb sebességgel mozognak; ha a hőmérséklet csökken, akkor a kaméleonok sebessége is csökken. (A valódi kaméleonok is élénkebbé válnak a hőmérséklet emelkedésével.) A kaméleonok sebessége az abszolút hőmérséklet négyzetgyökétől függ. (Ebben hasonlítanak a gázrészecskék mozgására.) A sebességet kifejezhetjük a hőmérséklet függvényében:

$$v'(T') = v(T) \cdot \sqrt{\frac{T'}{T}}. \quad (6.1)$$

ahol  $v(T)$  a kaméleon sebessége a  $T$  hőmérsékleten, és  $v'(T')$  a kaméleon sebessége a  $T'$  hőmérsékleten

### Ütközések

A kaméleonok a terrárium falával és egymással is teljesen rugalmas módon ütközhetnek. A rugalmas ütközésnél a lendület-megmaradás mellett, az ütköző testek mozgási energiájának összege is állandó. A terrárium falával való ütközéskor úgy vettük, hogy a fal végtelenül nagy tömegű a kaméleonhoz képest, ezért a falról a kaméleon úgy pattan vissza, hogy a fallal párhuzamos sebességkomponense megmarad, a falra merőleges sebességkomponense ellentétesre változik.

A kaméleonok mozgásuk során egymással rugalmasan és centrálisan ütközhetnek; a kaméleonok forgásától eltekintünk. Az egyszerűség kedvéért úgy vettük, hogy az összes kaméleonnak megegyezik a tömege; ezért az ütközés után gyakorlatilag csak meg kell cserélni az ütközés előtti sebességkomponenseket a két ütköző kaméleon között.

## A kaméleonok színváltása

A kaméleonok bizonyos esetekben meg tudják változtatni a színüket pillanatszerűen, a következő szabályok szerint.

### Azonos színű kaméleonok találkozása

Ha a terráriumban két azonos színű kaméleon találkozik, akkor nem történik semmi különös, gyakorlatilag csak rugalmasan ütköznek egymással; ilyenkor biztosan nincs színváltás.

### Különböző színű kaméleonok találkozása

Ha két eltérő színű kaméleon találkozik, akkor megijednek egymástól. Mivel ijedtségükben szeretnének elbújni, ezért körülnéznek az  $R$  ( $R > r$ ) sugarú környezetükben, megszámlálják, hogy az  $R$  sugarú környezetükben melyik színű kaméleonból van a legtöbb darab, és átváltanak arra a színre, hogy a lehető legjobban beleolvadjanak a környezetükbe. Ha az  $R$  sugarú környezetükben legfeljebb csak 1-1 darab különböző színű kaméleont látnak, akkor nem váltanak színt. (Az  $R$  paraméter értékét mi állíthatjuk be a program elején.) Ezután rugalmasan ütköznek és haladnak tovább.

### **Immunitás**

Ha egy kaméleon színt vált, akkor bizonyos ideig immúnissá válik a többivel szemben, azaz egy darabig nem ijed meg semelyik másik kaméleontól, és nem vált színt. Jelöljük az immunitási időt a  $szín_1$  színre váltott kaméleonok esetén  $t_{imm\_szin1}$ -gyel, a  $szín_2$  színre váltott kaméleonok esetén  $t_{imm\_szin2}$ -vel, ..., a  $szín_s$  színre váltott kaméleonok esetén  $t_{imm\_szins}$ -sel! Az egyes immunitási időket a program elején beállíthatjuk; az értékük lehet zéró is, ilyenkor nincs immunitás.

Ha letelik a színváltás utáni immunitási idő, akkor ismét ijedőssé válnak a kaméleonok, azaz ismételten színt válthatnak a megfelelő esetekben. Miért vezettük be az immunitási időt? Ha egy kaméleon színt váltott az ijedtség következtében, akkor ehhez energiát kellett elhasználnia; ettől kicsit elfárad, kimerül a kaméleon, és bizonyos ideig nem törődik a többi kaméleon színével.

A programban az immunitási időkkel tudjuk megadni, hogy bizonyos színű kaméleonok helyzeti előnyben (vagy hátrányban) vannak a többiekkel szemben. Az immunitási idő növelésével helyzeti előnybe kerül az adott színű kaméleon, mert az adott színre történő váltás után egy darabig biztosan megmarad a színe. Mivel az immunitási idők egyformák is lehetnek (akár zérók is), ezért nem kötelező helyzeti előnybe, vagy hátrányba hozni semelyik színű kaméleonokat sem, ez csak egy lehetőség a programban.

Az élet számos területén lehet helyzeti előnyben valaki, vagy valami a többiekkel szemben. Fizikai vonatkozású példák is vannak. Ha egy sokrészecske rendszerben különböző részecskék találhatók, akkor előfordulhat, hogy bizonyos típusú részecskéknek kedveznek az adott körülmények pl. egy reakció tekintetében. Ekkor ezek a részecskék helyzeti előnybe kerülnek a többi részecskével szemben. Természetesen más körülmények esetén másik típusú részecskék kerülhetnek helyzeti előnybe.

A fázisátalakulásnál is lehet helyzeti előny. Például az egyik fázisban van egy kristálygóc, vagy kristálymag, ahol megindul a kristályosodás; a másikban nincs, és ott nem indul meg.

### **Lehet-e a rendszerünk stabil?**

A kaméleonok találkozásai következtében a terráriumban lévő kaméleonok színeloszlása akár pillanatonként változhat, csak a kaméleonok összes száma ( $N$ ) marad állandó. A feladatban azt a kérdést tettem fel, hogy kialakulhat-e olyan állapot, hogy a terráriumban lévő kaméleonok színeloszlása nem változik tovább.

Léteznek stabil végállapotok és véletlenszerűen kialakuló ideiglenesen stabil állapotok.

### Stabil végállapotok

Ha a terráriumon belül a folyamat során valamikor az összes kaméleon színe megegyezik, akkor ezután már hiába találkoznak egymással, nem lesz több színváltás. Tehát stabil végállapotban az összes kaméleonnak azonos a színe a terráriumban. A rendszerben a fázisátalakulást az jelzi, ha hirtelen kialakul a rend, azaz a stabil állapot.

### Ideiglenesen stabil állapotok

Ha a terráriumon belül vannak különböző színű kaméleonok, de ezek pont úgy mozognak, hogy a különböző színű kaméleonok sosem találkoznak egymással, akkor gyakorlatilag nem lesz színváltás, azaz marad mindegyik kaméleon olyan, mint amilyen előtte is volt.

Képzeljük el például, hogy a kaméleonok szín szerint elkülönülve, vízszintes sávokban helyezkednek el és pontosan  $x$  irányban (vagy ellentétesen) mozognak, ezért hiába ütköznek, marad a sebességük  $x$  irányú (vagy ellentétes). A példa szerint tehát valamikor (véletlenszerűen) szín szerint szeparálódtak a kaméleonok és utána már nem kerülnek újra kapcsolatba egymással. Ez az állapot azonban nem stabil: ha csak az egyik kaméleon sebessége eltér az  $x$  iránytól, azaz akármilyen kicsi, de  $y$  irányú sebességkomponense is van, akkor (i) a két végfalon való ütközések következtében kiszóródik a vele azonos színűek sávjából, (ii) másik, azonos színű kaméleonnal ütközve annak átadja kis  $y$  irányú sebességét, ez a folyamat is a sávból való kiszóródáshoz vezet. Így a korábban szeparálódott kaméleonok találkozni fognak, és újra lehet színváltás. Hasonlóképpen akár  $y$  irányú sávokban is szeparálódhatnak véletlenszerűen a kaméleonok, ez is egy ideiglenesen stabil állapot lenne.

### **A rendparaméter**

Vezessük be a rendszerünk rendezettségének jellemzésére a  $q$  rendparamétert! A rendparaméter egy 0 és 1 közötti szám. A szimuláció  $i$ -ik időpillanatban a rendparamétert  $q_i$ -vel jelöljük. A rendparaméter megmutatja, hogy az adott pillanatban a rendszerünk mennyire van rendezett állapotban [84, 85]. (A rendparamétert bizonyos határokon belül szabadon választhatjuk meg úgy, hogy praktikus legyen az adott feladathoz.)

Ha a terráriumban az  $i$ -ik időpillanatban az  $s$  féle lehetséges színű, összesen  $N$  darab kaméleon színeloszlása egyenletes, azaz bármely színű kaméleonok száma  $N/s$ , akkor ezt tekintjük a rend teljes hiányának ( $q_i=0$ ). Ha a terráriumban csak azonos színű kaméleonok vannak, akkor ezt tekintjük a teljes rendnek ( $q_i=1$ ), mivel ezután már biztosan nem lehet színváltás. Az  $i$ -ik időpillanatban a rendparamétert a következőképpen definiáltuk [B11]:

$$q_i = \frac{|s \cdot N_{i,szín1} - N| + |s \cdot N_{i,szín2} - N| + \dots + |s \cdot N_{i,színs} - N|}{2 \cdot (s-1) \cdot N}, \quad (6.2)$$

ahol  $N_{i,szín1}$  az  $i$ -ik pillanatban  $szín_1$  színű kaméleonok darabszáma,  $N_{i,szín2}$  az  $i$ -ik pillanatban  $szín_2$  színű kaméleonok darabszáma,  $\dots$ ,  $N_{i,színs}$  az  $i$ -ik pillanatban  $szín_s$  színű kaméleonok darabszáma,  $N$  pedig az összes kaméleon darabszáma.



## 6.2 Szimulációs eredmények

A szimulációs feladatban a kérdésem az volt, hogy a különböző színű kaméleonok kezdeti számának megadása után, véletlenszerű kezdeti állapotból (helykoordináták, sebességkoordináták) kiindulva eljuthatunk-e valamelyik stabil végállapotba?

A kérdésre általánosságban nem lehet válaszolni; csak a konkrét véletlenszerűen választott kezdeti értékek ismeretében lehet valamit mondani. Általános esetben nem lehet a feladat elején megmondani, hogy a rendszer (a terrárium) stabil állapotba kerülhet-e véges számú lépés (találkozás) után.

A szimulációs feladatot úgy oldhatjuk meg, hogy a kezdőfeltételeknek megfelelően véletlenszerűen választunk egy kiindulási állapotot; ez lesz az  $i=0$  időpillanat. A kezdőállapotból kiindulva végrehajtunk egy elemi lépést, azaz az adott pillanatbeli helykoordináták és sebességek alapján kiszámítjuk, hogy a következő pillanatban melyik kaméleon hol lesz, történik-e ütközés a terrárium falával, vagy a kaméleonok között, és az eltérő színű kaméleonok ütközése estén színváltozás is előfordulhat. Ekkor megvizsgáljuk, hogy a rendszer stabil állapotba került-e. Ha stabil állapotba került, akkor vége a feladatnak. Ha a rendszernek az újonnan kiszámított állapota nem stabil, akkor a szimuláció folytatódik egy újabb elemi lépéssel.

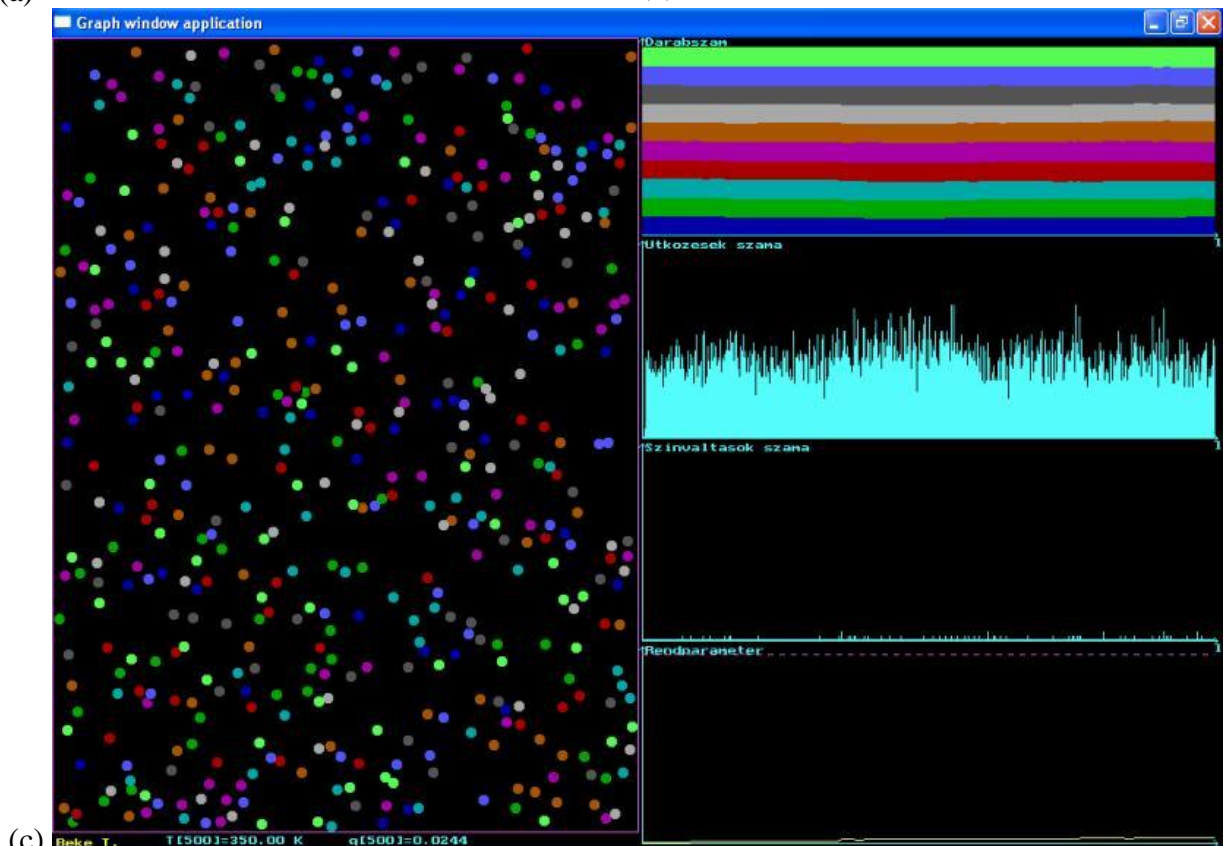
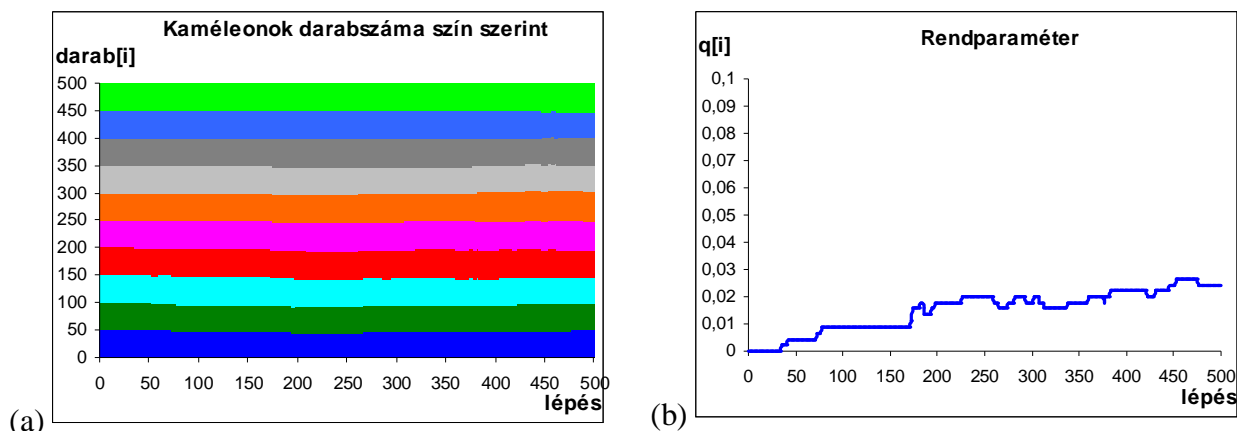
### Néhány szimulációs eredmény

A könnyebb összehasonlíthatóság kedvéért, a kiindulási állapot után a szimulációk 500 lépésből álltak ( $0 \leq i \leq 500$ ), és  $s=10$  lehetséges színt választottunk. Mindegyik esetben a  $szín_1$  színű kaméleonok kezdeti száma, és a  $szín_2$  színű kaméleonok kezdeti száma, ... és a  $szín_{10}$  színű kaméleonok kezdeti száma is 50 volt ( $N_{0, szín_1} = N_{0, szín_2} = \dots = N_{0, szín_{10}} = 50$ ). A különböző színű kaméleonok pillanatnyi darabszámát halmozott oszlop-diagrammon ábráztuk a szemléletesség érdekében.

#### 1. eset

Az 1. esetben mindegyik színhez egyforma értékű, közepes immunitási időket állítottunk be szimmetrikusan; és a kaméleonok  $R=2 \cdot r$  sugarú környezetüket érzékelték az ütközésük esetén. A rendparaméter értéke folyamatosan változott a zérus környékén. A 6.1. ábrán a szimuláció végeredményét láthatjuk.

Ha gázcseccskékben gondolkodunk, akkor a részecskék ebben az esetben egymással és a tárolóedény falával rugalmasan, centrálisan ütköznek. Az egyes részecskék között néha valamilyen átalakulás történhet (pl. fizikai, vagy kémiai reakció), ezt a színváltás jelzi. A ritka színváltások (átalakulások) nagyjából kiegyenlítetten történnek, a rendparaméter értéke 0,02 körül volt a szimuláció során.

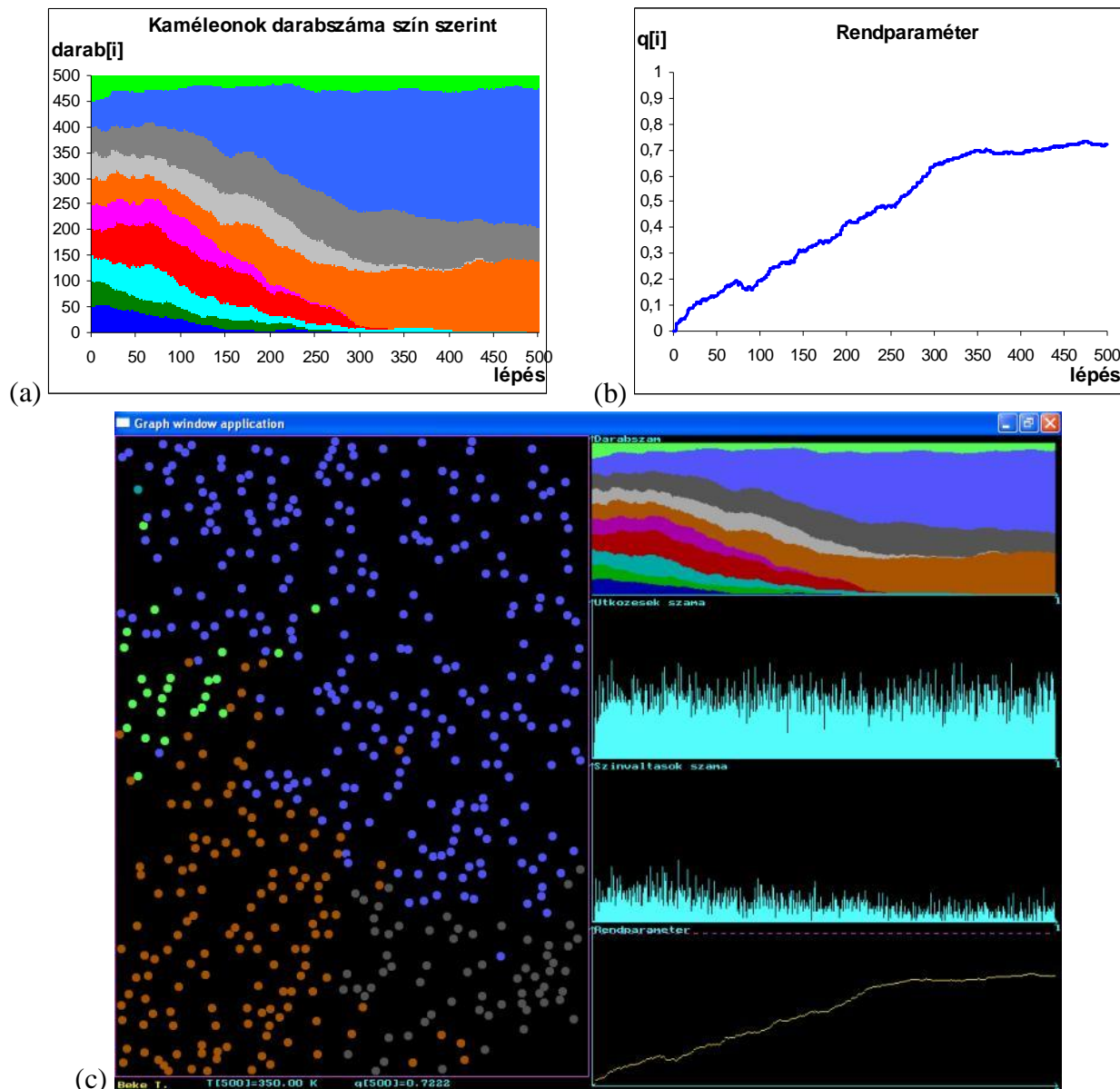


**6.1. ábra** Mindegyik színhez közepes immunitási időt állítottunk be szimmetrikusan, és a kaméleonok  $R=2 \cdot r$  sugarú környezetüket érzékelik ütközéskor. (a) A különböző színű kaméleonok pillanatnyi darabszáma; (b) A rendparaméter értéke; (c) A szimuláció végeredménye.

## 2. eset

A 2. esetben mindegyik színhez egyforma értékű, alacsony immunitási időket állítottunk be szimmetrikusan; és a kaméleonok  $R=3,5 \cdot r$  sugarú környezetüket érzékelték az ütközésük estén. Most az egyes részecskék között viszonylag gyakran történhet valamilyen átalakulás, amit színváltás jelez. A szimuláció elején a színváltások (átalakulások) még nagyjából kiegyenlítetten történnek, de a fluktuációk következtében néhány színben csökkenés, másokban növekedés tapasztalható. Azok a kaméleonok, amelyekből véletlenszerűen egyre több lett, kezdték uralni a közvetlen környezetüket. A rendszeren belül kisebb-nagyobb tartományok alakultak ki, amelyeken belül csupa azonos színű kaméleon volt. A véletlenszerűen megerősödött nagyobb méretű tartományok egyre nagyobbra nőttek, a kisebbek gyakorlatilag eltűntek.

A szimuláció végén már csak néhány darab egyszínű nagy tartomány maradt, az eredeti színek többsége teljesen eltűnt. A rendparaméter értéke folyamatosan növekedett, majd egy idő után nagyjából állandó maradt 0,75 környékén, mivel a nagyra hízott tartományok között egyfajta dinamikus egyensúly alakult ki. A 6.2. ábrán a szimuláció végeredményét láthatjuk.

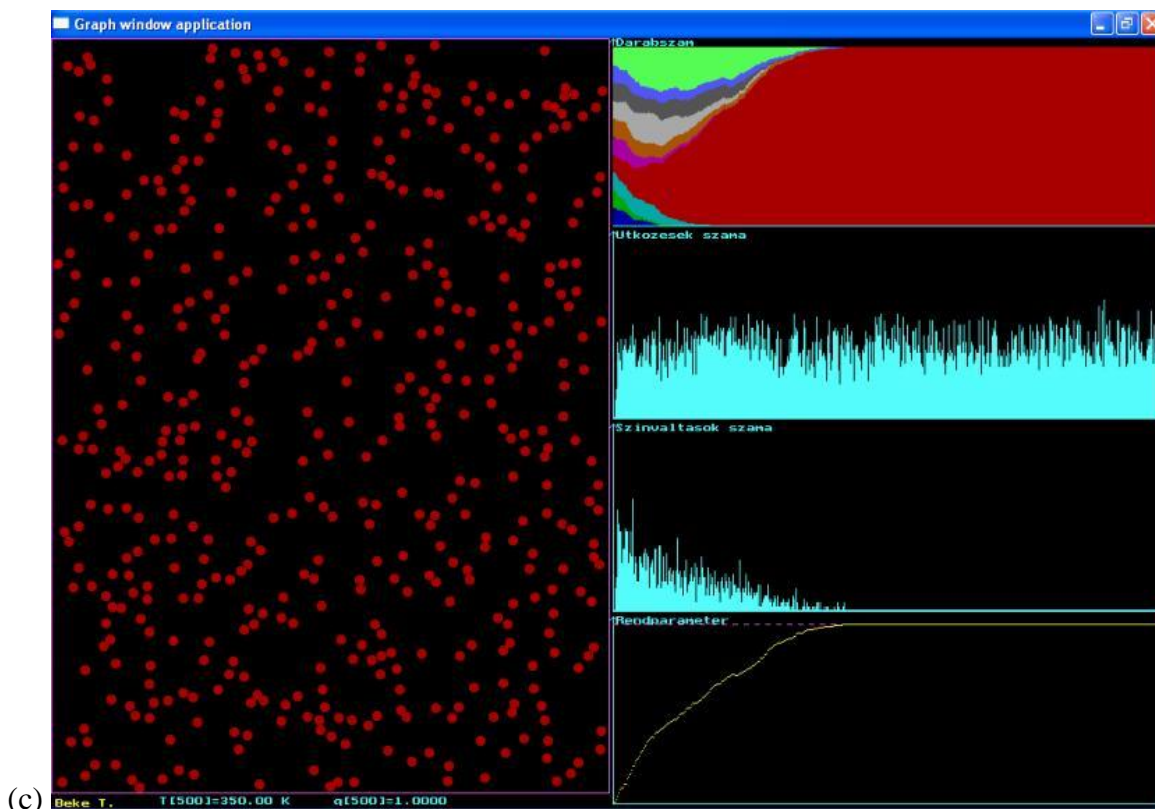
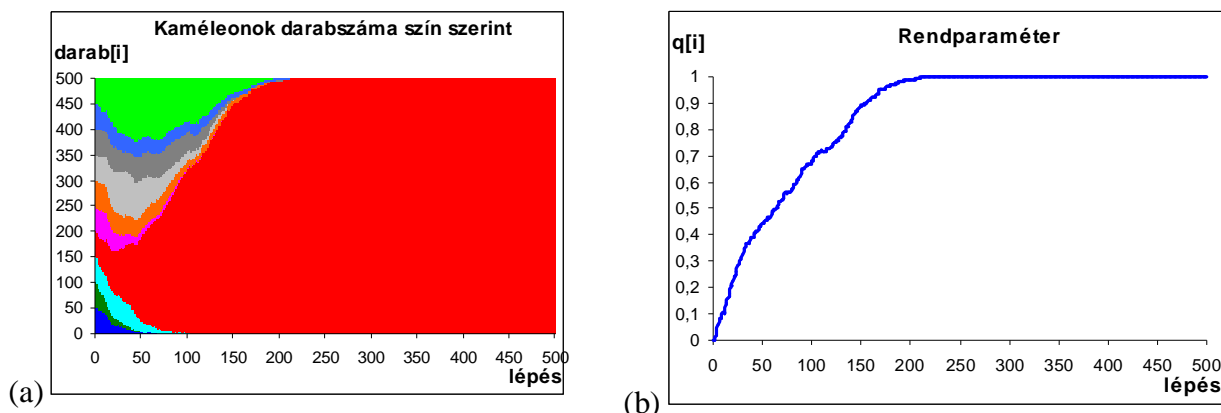


**6.2. ábra** Mindegyik színhez alacsony immunitási időt állítottunk be szimmetrikusan, és a kaméleonok  $R=3,5 \cdot r$  sugarú környezetüket érzékelik ütközéskor. (a) A különböző színű kaméleonok pillanatnyi darabszáma; (b) A rendparaméter értéke; (c) A szimuláció végeredménye.

### 3. eset

A 3. esetben  $(s-1)$  darab színhez egyforma értékű, alacsony immunitási időt állítottunk be szimmetrikusan; viszont az egyik, ún. kiválasztott színhez a többtől egy véletlen-számmal magasabb értékű immunitási időt állítottunk be. A kiválasztott színt tehát helyzeti előnybe hoztuk a többivel szemben, mert a magasabb immunitási ideje miatt az elején biztosan nem csökkenhet a darabszáma, illetve később is csak a többiektől ritkábban fordulhat elő színváltás.

A kaméleonok  $R=8 \cdot r$  sugarú környezetüket érzékelték az ütközésnél. A 6.3. ábrán a szimuláció végeredményét láthatjuk.



**6.3. ábra** Mindegyik színhez – egy kivétellel – alacsony immunitási időt állítottunk be, a kaméleonok  $R=8 \cdot r$  sugarú környezetüket érzékelik ütközéskor. (a) A különböző színű kaméleonok pillanatnyi darabszáma; (b) A rendparaméter értéke; (c) A szimuláció végeredménye.

Kezdetben az egyes egyedek között gyakran történt átalakulás. A szimuláció elején a színváltások (átalakulások) még nagyjából kiegyenlítetten történnek. A fluktuációk következtében néhány színben csökkenés, másokban növekedés tapasztalható; a kiemelt színben a többiektől erőteljesebb a növekedés a magasabb immunitási idő miatt. A kiemelt színű kaméleonok fokozatosan kezdték uralni a közvetlen környezetüket. A rendszeren belül az elején a többi színből is kialakultak kisebb tartományok, amelyeken belül csupa azonos színű kaméleon volt, de a kiemelt színű megerősödött legnagyobb méretű tartomány egyre csak hízott.

A szimulációban nagyjából 150 lépés alatt megtörténik a hirtelen fázisátalakulás, azaz csak a kiemelt színű tartomány marad meg, a többi szín eltűnt.

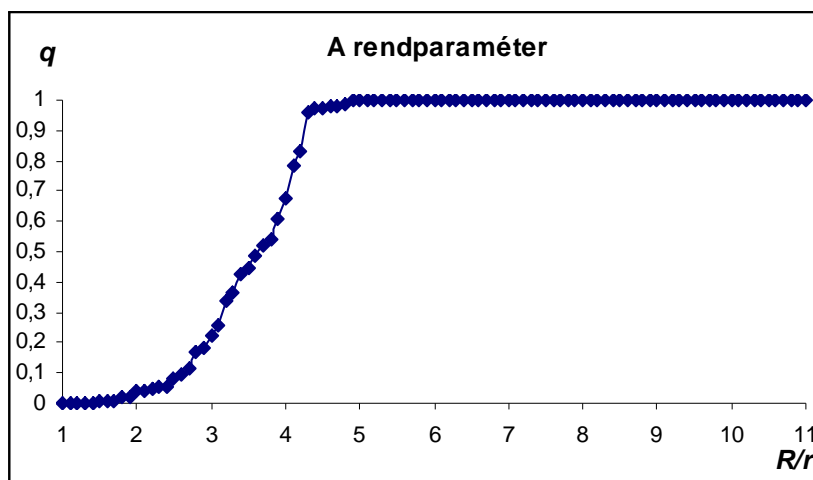
A modellben a pillanatszerű fázisátalakulásnak (hirtelen rend kialakulásának) is megvan a valószínűsége. Megfelelő paraméterek esetén, akár néhányszor tíz lépésben kialakulhat a rend.

#### Kritikus paraméterérték

A szimulációk indulásakor mind a 10 lehetséges színből azonos számú kaméleonunk volt, azaz rendparaméter értéke kezdetben mindig 0 volt. Egyes esetekben 500 lépés után is csak 0,01 környékén volt a rendparaméter, vagyis a rendszer szinte ugyanannyira rendezetlen maradt, mint az elején volt. Az előzőekben azt is láthattuk, hogy a kezdeti véletlenszerű, rendezetlen állapotból bizonyos paramétereknél akár néhányszor tíz lépés után (azaz viszonylag hirtelen) teljes rend alakult ki. Az immunitási idők beállításával, illetve az  $R/r$  érték növelésével érhetjük el, hogy a rend kialakuljon, azaz bekövetkezzen a fázisátalakulás.

Mekkora az a kritikus  $R/r$  érték, ahol számíthatunk a rend kialakulására? Ennek eldöntésére a tanulókkal készítettünk egy külön szimuláció-sorozatot, ahol a  $R/r$  értéket fokozatosan növeltük, és azt figyeltük, hogy 500 lépés után mekkora a rendparaméter értéke. Az 500 lépést azért választottuk, mert az előzőekben is mindig ennyi volt a lépésszám. Ha kialakul a teljes rend, akkor általában ennyi lépés bőven elegendő, sőt ettől jóval kevesebb is. Minden esetben  $s=10$  különböző kezdőszín volt, és mindegyik színből 50 kaméleon volt, kezdetben véletlenszerűen elhelyezve a terráriumban. (Eddig tehát megegyeztek az előző esetekkel.) Az immunitási idők választásában viszont különbözött ez a szimuláció-sorozat az előzőektől, ugyanis egy (kiemelt) színnél véletlenszerűen volt valamekkora immunitási idő, míg a többinél ez végig 0 érték maradt.

A megadott feltételekkel lefuttattunk 1000 db szimulációt úgy, hogy a  $R/r$  értéket 1,1-től kezdve 11-ig fokozatosan növeltük 0,1-es lépésközzel, és minden esetben 10 szimulációt hajtottunk végre; azaz 100-szor 10 db szimulációt futtattunk le összesen. A végeredményt statisztikailag elemeztük. A 6.4. ábrán az  $R/r$  érték függvényében a  $q$  rendparaméter átlagértéke látható.



**6.4. ábra** A rendparaméter értékének változása a  $R/r$  függvényében. (Minden szimuláció esetén a teljesen rendezetlen rendszerből indultunk ki, azaz kezdetben  $q=0$  volt.)

Láthatjuk, hogy a rendparaméter a  $R/r$  érték függvényében a 4 környékén meredeken megemelkedik, azaz a mi rendszerünkben itt van az a kritikus paraméterérték, ahol a rendezetlen rendszerben kialakul a rend, vagyis bekövetkezik a fázisátalakulás.

Ebben a modellben a hőmérséklet közvetlenül nem befolyásolja a fázisátalakulást. Közvetett módon természetesen a hőmérséklet is számít, hiszen ha nagyon alacsony a terrárium hőmérséklete, akkor nagyon lassan mozognak a kaméleonok, ezért csak nagyon ritkán találkozhatnak és csak nagyon ritkán lehet közöttük színváltás. A dolgozatban csak egy kaméleonos játék modellt mutatok be területi korlátok miatt. A projektben a tanulókkal más kaméleonos programokat is készítettünk. Ezek között volt olyan, ahol a hőmérséklettől is függött a kaméleonok színváltása, azaz a fázisátalakulás a hőmérséklettől is függött.

### **A projekt tapasztalatai**

A tanulókkal közösen kifejlesztettünk egy kaméleonos játékos számítógépes programot, melyben egy terráriumban (rendszerben) lejátszódó kölcsönhatásokat modelleztünk. A projekt előtt megkérdeztem a tanulókat, hogy volna-e kedvük egy olyan programozási feladathoz, amely részecske rendszerek kollektív viselkedéséről szól. A tanulókat ebben a formában sajnos nem érdekelte a feladat. Néhány hét múlva visszatértem a témához, de máshonnan közelítettem meg a problémát. Ekkor vettem fel nekik a kaméleonos játék ötletét, amely már felkeltette az érdeklődésüket. Miután közösen elkészítettük az első modellt, és lefuttattuk a szimulációkat, a tanulók is elgondolkodtak a meglepő eredményeken.

A tanulókkal készítettünk olyan terrárium modelleket is, ahol a kaméleonok más szabályok szerint viselkednek. Az alapprogram közös elkészítése után a különböző viselkedési modellek programozása már viszonylag egyszerűbb feladat volt, ilyen átalakításokat önállóan is kitaláltak a diákok. Annyi kikötést tettem, hogy a szabályok között nem lehettek ellentmondó, vagy értelmetlen szabályok. A tanulókat arra biztattam, hogy olyan szabályrendszert adjanak meg, amely valamilyen létező, vagy legalább elképzelhető rendszer viselkedését írja le. A tanulók szabadon kísérleteztek különböző viselkedésű kaméleonok megadásával. A projektben résztvevő diákok élvezték a munkát; a tanulók a feladatot játéknak tekintették. Örültek annak, hogy milyen bonyolult jelenség szimulációját készítettük el játékos formában. A pedagógusnak fontos szerepe van abban, hogy olyan feladatokat találjon ki (akár a tanulókkal együttműködve), amelyekben a diákok önként vesznek részt, mert érdekli őket. Ekkor olyan ismereteket is elsajátítanak a diákok, amelyek akár jóval meghaladják az előírt (elvárt) tanulói tudásszintet.

A kaméleonok viselkedése (a terrárium időbeli evolúciója) analitikus alakban nem oldható meg. A rendszer időbeli fejlődését számítógépes szimulációval vizsgálhatjuk meg. A rendszert alkotó egyedek kollektív viselkedésének tanulmányozása nem része a középiskolai tananyagának, de a tanulókat mégis érdekelték a játékos szimuláció során tapasztalt jelenségek. A képzeletbeli rendszerünkhöz hasonlóan viselkedő fizikai rendszerekben is lezajlanak olyan jelenségek, mint amelyeket a szimulációk során tapasztaltunk (pl. fázisátalakulás). A játékos feladat során a tanulók fizikai és informatikai ismeretei is gyarapodtak. Ehhez hasonló modellek segíthetik a tanulókat abban, hogy bizonyos fizikai, kémiai, biológiai, szociológia stb. folyamatokat megértsenek.



## 7. Termoakusztikai projektfeladat

Ebben a fejezetben egy termoakusztikával foglalkozó projektfeladatot szeretnék bemutatni. Mivel ez egy kevésbé ismert területe a fizikának, ezért elsőként áttekintem a termoakusztika alapfogalmait. A projekt elején a tanulókkal termoakusztikához kapcsolódó érdekességeket gyűjtöttünk [B12]. A termoakusztika a hő hatására létrejövő hanghatás vizsgálatával foglalkozik. Termoakusztikai instabilitásnak nevezzük, ha egy termodinamikai rendszerben a nyomás oszcillációja párosul az egyenetlen hőátadással; a fűtött rendszerben a kialakuló hang olyan oszcilláló hőátadást eredményez, ami a hangrezgéseket felerősíti. A termoakusztika alapvető szerepet játszik számos technikai alkalmazásban: pl. rakétahajtóművek, vagy gázturbinák és égőkamrák instabilitásai [86, 87, 88]. A hang hatására kialakuló vibráció és a fokozott hőátadás rontja a berendezés működésének hatásfokát, illetve csökkenti az élettartamot; ezért is fontos a szakemberek számára, hogy a jelenség részleteit megismerjék.

A termoakusztikai vizsgálatoknak érdekes történeti előzményei vannak [89 -95]. Petrus Leonardus Rijke fizikaprofesszor volt a Leideni Egyetemen. Rijke 1859-ben fedezte fel, hogyan lehet egy mindkét végén nyitott csőben hanghatást kelteni [90]. A kísérletekhez egy kb. 4,5 cm átmérőjű függőleges helyzetű üvegcsövet használt; elhelyezett egy fémhálót a cső alsó felében, majd a hálót izzásig hevítette gázláng segítségével. Miután eltávolította a lángot, erős hangot észlelt, amely nagyjából pár másodpercig tartott; addig, amíg a fémháló ki nem hűlt. Rijke a lánggal való melegítés helyett kipróbálta az elektromos fűtést is. Folytonos fűtés esetén folytonos hanghatást észlelt. Rijkét eredetileg a jelenség a zenei hangok szempontjából érdekelte, de a kísérletek elvégzése után nem találta a csövet megfelelő hangszernek [87, 90]. A Rijke-cső az egyik legegyszerűbb termoakusztikus eszköz, amely a hő akusztikus energiává alakítja [95 – 98].

### 7.1. Gázzal fűtött Rijke-csövek vizsgálata

Az iskolai projektünk főtémája: termoakusztikus jelenségek vizsgálata Rijke-csövek segítségével; az altémák: gázzal fűtött Rijke-csövek vizsgálata, elektromosan fűtött Rijke-csövek vizsgálata és a csövek viselkedésének modellezése. A méréseket délutánonként végeztük fizika szakkör-foglalkozásokon. A kísérleteket csoportmunkában végeztük, a csoportokban 3–6 tanuló dolgozott együtt [B13, B14, B15].

Ebben a projektben is önkéntes alapon vehettek részt a diákok. A projekt több éven keresztül tartott, közben néhány tanuló leérettségizett, illetve újabb tanulók érkeztek. Szerencsére ez nem okozott különösebb problémát; sikerült úgy megszerveznem a munkát, hogy az újonnan érkezettek zökkenőmentesen be tudtak kapcsolódni a projektbe.

Egy mindkét végén nyitott csőben, mint amilyen a Rijke-cső is, akusztikus állóhullámok alakulhatnak ki. Ennek az eredménye, hogy a gáz a cső minden részén váltakozva összenyomódik és kitágul, oszcillál. Álló hanghullámok könnyen kelthetők a csőben valamilyen energiaforrás segítségével. Ha az energia beáramlása megszűnik, a hanghullám amplitúdója csökken, mivel súrlódás lép fel a cső falánál és energia vész el a cső végénél is [87].

### 7.1.1 Az iskolai projekt

A Rijke-cső úgy került a figyelmünkbe, hogy Dr. Papp Katalin tanárnő (SZTE, Kísérleti Fizikai Tanszék) megemlítette, mint érdekes, kísérleti eszközt. A tanárnő javasolta, hogy érdemes lenne alaposabban is megvizsgálni a cső működését. Ezután készítettem egy Rijke-csővet és bemutattam a tanulóknak. Mivel többeknek megtetszett az ötlet, ezért elindítottam egy külön projektet. A projekt időtervében eredetileg 1 tanévre terveztem a munkát, de ennyi idő nem volt elegendő, ezért a következő tanévben is folytatódtak a vizsgálatok.

Egy-egy tanulói csoport vizsgálta az egyes csövek viselkedését, az eszközök egy részét közösen használtuk (pl. zajsztmérő, digitális hőmérők). Ez külön szervezést igényelt. Ezen kívül ügyelnünk kellett arra is, 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 fejlesztettem, sőt a szociális kompetenciák (osztozkodás a közös eszközökön) is fejlődtek. Minden mérést legalább ötször megismételtünk és az átlagértékekkel számoltunk tovább; a kapott eredményeket számítógépen rögzítettük [B13, B14, B15]. Hibaszámításokat is végeztünk a tanulókkal. Általánosságban azt mondhatom, hogy a legtöbb mért mennyiség esetén nagyjából 5-10%-os átlagos relatív hiba adódott. Legkevesbé pontosan a forró rács hőmérsékletét mértük, itt 15-20%-os volt az átlagos relatív hiba. (Ennek magyarázatára később visszatérek.)

#### A Rijke-cső megépítése

A Rijke-cső 3 komponensből épül fel:

- Mindkét végén nyitott cső (lehet fémből, vagy üvegből); a cső átmérője 3–15 cm között szokott lenni, a hossza általában 30–150 cm.
- A hőforrás lehet gázégő, illetve használhatunk elektromos hőforrást is. A projektünk első szakaszában a kísérleteinkhez különböző teljesítményű gázégőket használtunk.
- Fémháló, amelyet a Rijke-cső belsejébe helyezünk el. A fémrácsot gázláng segítségével melegítjük.

A következő kísérleteket végeztük el [B16, B17]:

- A dróthálót egy adott helyzetben rögzítettük a csőben, majd meggyújtottuk a lángot és egészen izzásig hevítettük a rácsot, majd a gázlángot kihúztuk a csőből. A rács helyzetétől, a melegítés idejétől és teljesítményétől függően keletkezhet hang a csőben.
- Ha a kísérlet során a hangot kibocsátó Rijke-csővet felülről befedtük egy fémlappal, akkor a légáramlás megszűnt és vele együtt a hanghatás is abbamaradt.
- Különböző hosszúságú csöveket alkalmazva megfigyeltük, hogyan függ a cső hosszától a kialakuló hang frekvenciája.
- A vízszintes helyzetű Rijke-cső alapesetben nem bocsátott ki hangot semmilyen rács helyzet esetén sem. Ha viszont légáramlást keltettünk a csőben, akkor keletkezhet hang.



A mérések során a következő összefüggésekre kerestünk választ [B16, B17]:

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

A mérésekhez a következő eszközöket használtuk:

- Rijke-csövek állványzattal (3 db alumínium, 2 db acél és 1 db réz csövet, illetve 3 db üvegből készült csövet is használtunk, mert azokon könnyű volt szemléltetni a drótakadály helyzetét).
- Szabályozható teljesítményű gázégők.
- Drótakadályok (rácsok), melyek az adott átmérőjű csövekbe beleillettek.
- Hosszmérésre mérőszalag és vonalzó.
- Hang rögzítésére és mérésére szolgáló eszköz (mikrofon és számítógép hangkártyával).
- A hőmérsékletek mérésekhez IR-380 és IR-1000L típusú digitális infrás hőmérőket használtunk.
- A levegő áramoltatásához egy porszívó.
- Hangintenzitás-szint mérőműszer: a kvantitatív eredményekhez volt szükség a műszerre, egyébként e nélkül is elvégezhetőek a kísérletek. A hangintenzitás a levegőben terjedő hanghullám teljesítményének jellemzésére szolgál: a terjedés irányára merőleges egységnyi felületen másodpercenként áthaladó hangenergia értéke. A hangintenzitás-szint két hangintenzitás érték hányadosának tízes alapú logaritmusának tízszerese. (Jele  $L_I$ , mértékegysége a dB.) A mérésekhez Voltcraft 322 Datalog típusú digitális zajszintmérőt használtunk.

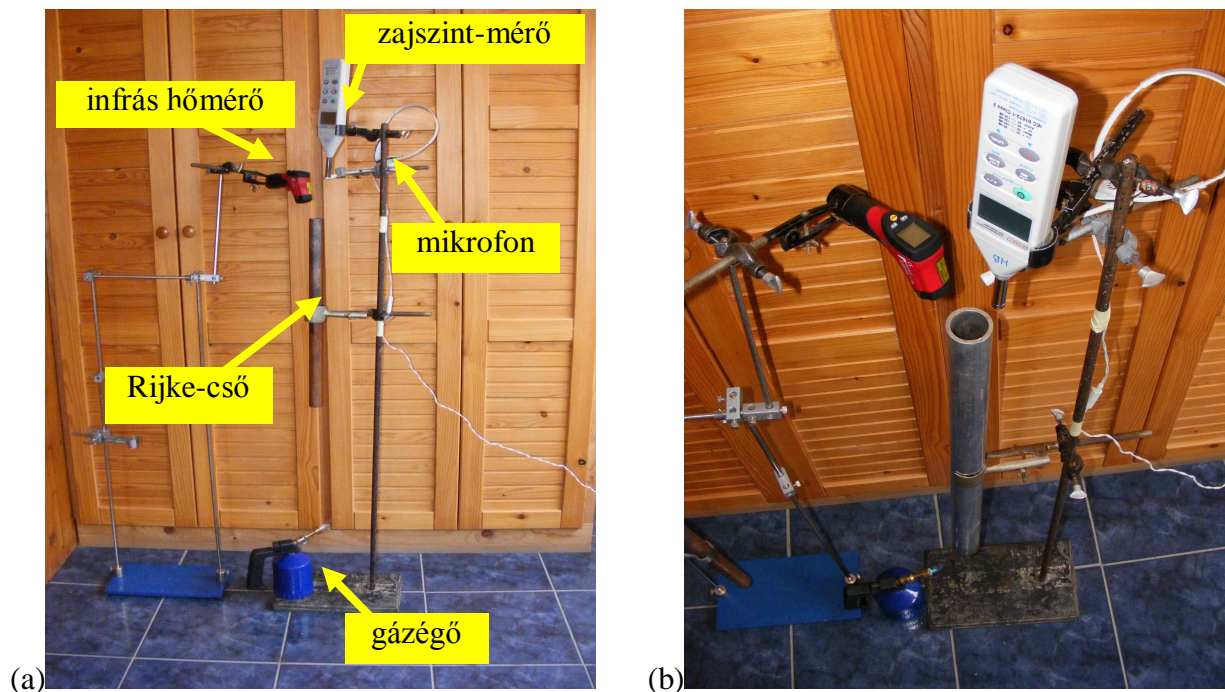
A kísérletekben használt csövek jellemzői a 7.1. táblázatban találhatóak.

**7.1. táblázat** Az iskolai projektben használt Rijke-csövek paraméterei.

Rijke-csövek	Anyaga	Hossz $L$ [mm]	Külső átmérő [mm]	Belső átmérő [mm]	Emisszió-fok ( $\epsilon$ )
1.	üveg	200	30	28	0,94
2.	üveg	400	30	28	0,94
3.	réz	470	29	27	0,83
4.	alumínium	768	50	40	0,90
5.	üveg	800	30	28	0,94
6.	acél	910	48	38	0,91
7.	acél	1020	48	38	0,91
8.	alumínium	1200	78	72	0,89
9.	alumínium	1502	100	94	0,89

A felsorolt eszközök megtalálhatóak az oktatási intézményekben; ezek tehát nem kerültek külön pénzbe. A hangintenzitás-szintmérőt kölcsönbe kaptuk a mérések idejére.

Szerencsére nincs feltétlenül szükség az eszközre, tulajdonképpen a mikrofon és a számítógép elegendő ahhoz, hogy relatív hangosságokat megállapítsunk. A 7.1. ábrán egy-egy adott mérési elrendezést látható.



**7.1. ábra** A termoakusztikai vizsgálatokhoz használt függőleges helyzetű Rijke-csövek a mérőberendezésekkel együtt: (a) rézcső; (b) a legrövidebb alumínium cső.

### 7.1.2. A mérés menete

Első lépésként az egyes gázégők teljesítményét kellett meghatározni. A teljesítmény mérését visszavezettük a hőmérsékletváltozás és az idő mérésére: meghatározott mennyiségű vizet melegítettünk egy alumínium tárolóedényben, és a hőmérsékletváltozást mértük. A melegítés hatásfokát nem ismertük, hiszen melegedett a tárolóedény és a környező levegő is. Ezt úgy küszöböltük ki, hogy különbségi méréseket végeztünk. Jelölje  $P_i$  az adott gázégő teljesítményét az  $i$ -ik fokozatban. Ebben az égőfokozatban 2 db mérést végeztünk, az első  $t_{i1}$ , a második  $t_{i2}$  ideig tartott. A víz tömege  $m_{\text{víz}}$ , fajhője  $c_{\text{víz}}$ , az alumínium tárolóedény tömege  $m_{\text{al}}$ , a fajhője  $c_{\text{al}}$ , a hőmérsékletváltozás az 1. esetben  $\Delta T_{i1}$ , a 2. esetben  $\Delta T_{i2}$ . Az edény külső környezetének hőkapacitását jelölje  $C_{i1}$ , illetve  $C_{i2}$  az egyes mérésekben. Ezek elviekben különbözőek, hiszen a környező levegő melegedése függ a melegítés időtartamától, és a levegő mozgása miatt az edénnyel kölcsönható levegőmennyiség sem állandó, de ha azonos mennyiségű vizet melegítünk ugyanabban a tárolóedényben, ugyanakkora teljesítménnyel, és a két mérés időtartama nem tér el jelentősen egymástól, akkor az egyszerűség kedvéért a környezet hőkapacitását egyenlőnek tekinthetjük a két mérés során; azaz  $C_{i1}=C_{i2}=C_i$ . Hasonló okból a környezet hőmérsékletváltozását is azonosnak tekinthetjük, azaz  $\Delta T_{i1}'=\Delta T_{i2}'=\Delta T_i'$ . (A víznek és a tárolóedénynek a hőmérsékletváltozásai nem túlzottan nagyok, a gázláng hőmérséklete közelítőleg ugyanakkora a két mérés során.)

Az energiaváltozás az 1. mérés esetén

$$P_i \cdot t_{i1} = c_{v\acute{z}} \cdot m_{v\acute{z}} \cdot \Delta T_{i1} + c_{al} \cdot m_{al} \cdot \Delta T_{i1} + C_{i1} \cdot \Delta T_{i1}', \quad (7.1)$$

és a 2. mérés esetén

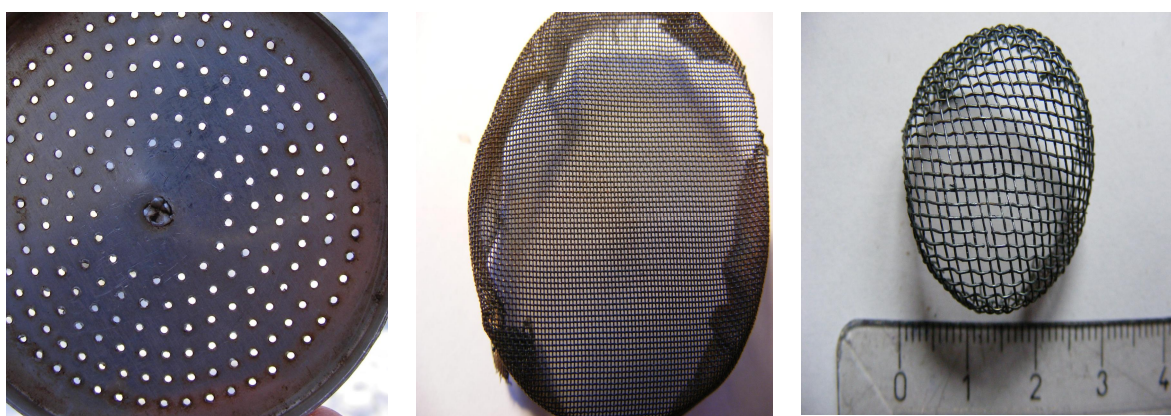
$$P_i \cdot t_{i2} = c_{v\acute{z}} \cdot m_{v\acute{z}} \cdot \Delta T_{i2} + c_{al} \cdot m_{al} \cdot \Delta T_{i2} + C_{i2} \cdot \Delta T_{i2}'. \quad (7.2)$$

Az egyszerűsítések után kapjuk az adott gázégő  $i$ -ik fokozatának teljesítményét:

$$P_i = \frac{(c_{v\acute{z}} \cdot m_{v\acute{z}} + c_{al} \cdot m_{al}) \cdot (\Delta T_{i2} - \Delta T_{i1})}{t_{i2} - t_{i1}}. \quad (7.3)$$

Ezután a Rijke-csőbe helyezett fém akadályok (rácsok) áteresztőképességét határoztuk meg [B17]. A rácsok áteresztőképessége is befolyásolja a hang kialakulását; ennek szerepére később még visszatérek. Két különböző típusú akadályt használtunk. Az egyiket úgy kaptuk, hogy fémlemezket fűróval több helyen kifúrtunk, de például régi kávéfőző szűrőt is kipróbáltunk rács gyanánt. A másik típusú akadályok fémből készült dróthálók voltak.

Első ötletünk az volt, hogy a Rijke-csőhöz egy porszívót kötünk, majd mérjük az adott idő alatt átáramlott levegő mennyiségét úgy, hogy a csőben benne van az akadály, illetve úgy, hogy a cső üres. A két mérés aránya (elméletben) megadja az akadály áteresztőképességét. Sajnos ez a módszer a gyakorlatban csak az alacsony áteresztőképességű akadályok (a perforált fémlemez) esetén működött, a drótrácsok esetén ugyanis nem volt mérhető különbség a két eset között; ezért itt más módszert választottunk. A rácsokról digitális fényképet készítettünk szupermakro módban, majd megmértük egy üres négyzetrács méretét, megszámloltuk a cső belsejébe eső ilyen négyzetrácsok számát (a szélén lévő torzult rácshelyeket kisebb méretűnek vettük), majd összesítettük a területeiket. Az összes üres terület és a cső belső keresztmetszetének hányadosa megadta a rács áteresztőképességét. A mérésekhez használt rácsok áteresztőképességei 10% és 95% között voltak (7.2. ábra).



**7.2. ábra** Különböző akadályok. A drótrácsok áteresztőképességének meghatározása digitális fénykép alapján történt.

A csöveket nem tudtuk megszólaltatni, ha az akadályok áteresztőképessége kb. 20%-nál kisebb volt. A rácsok egy része gyakran szétégett, elrepedezett. A kísérletekhez legjobban egy magas olvadáspontú acélból készült, kb. 80%-os áteresztőképességű rács vált be.

Ha a gázláng teljesítménye túlzottan nagy volt, akkor természetesen bármelyik fémháló elolvadt, ezután már használhatatlan volt a kísérletekhez; ezért feltétlenül valamilyen magas olvadáspontú fémrácsra van szükség a mérésekhez [B13, B14, B16].

A hőmérséklet mérése IR-380 és IR-1000L típusú érintésmentes mérőműszerrel történt, mely a hőmérsékletet az objektum által az infravörös tartományban kisugárzott energia alapján határozza meg, az emisszió-fok figyelembe vételével. A hőmérő az objektum felületi hőmérsékletét méri, mérési tartománya  $-50\text{ °C}$ -tól  $1000\text{ °C}$ -ig terjed. Az emisszió-fok ( $\varepsilon$ ) több jellemzőtől (pl. az anyagtól és a felület minőségétől) is függ. Ahhoz, hogy egy adott anyagból készült tárgy emissziós fokát meghatározzuk, ismerni kellene előre a hőmérsékletét, majd az infrás hőmérőn az  $\varepsilon$  értéket addig kell módosítani, amíg maga az infrás hőmérő is ugyanezt a hőmérsékletet jelzi. Ezért egy nagy fazékba vizet töltöttünk, majd az edénybe behelyeztük a különböző csöveket, a rácokat és egy hagyományos folyadékos hőmérőt úgy, hogy félig belemerüljenek a vízbe. A fazékba addig adagoltunk jeget, amíg az már nem olvadt tovább, azaz a jeges víz hőmérséklete a benne lévő testekkel együtt  $0\text{ °C}$ -os volt. Ezután lassan elkezdjük melegíteni az edényt, egészen a víz forráspontjáig. Közben a folyadékos hőmérőn láttuk a hőmérsékleteket, és mértük a testek emissziós fokát a vízfelszín feletti részen [B17].

Az emissziós fokok meghatározása után a Rijke-csövek hőmérsékletét könnyedén mérni tudtuk, de a rács hőmérsékletének meghatározása problémát jelentett. Egyfelől néha túlléptük a műszer felső méréshatárát, azaz csak annyit tudtunk, hogy a rács hőmérséklete  $1000\text{ °C}$  felett van, de a pontos értéket nem ismertük. Másfelől problémát okozott a mérőműszer célzólézerével pontosan ráfókuszálni a rácra, hiszen nem helyezhettük közvetlenül a cső fölé a hőmérőt, mert az áramló forró levegő megolvasztotta volna, ezért kicsit ferdén, oldalról kellett mérni. Ekkor viszont a műszer nagyon kicsi elmozdulása is okozhatta azt, hogy a következő pillanatban már nem a rácson volt a fókusz. Ez meg is látszott az eredményekben. A mérési sorozatokban a rács hőmérsékletének mérése során adódott a legnagyobb fluktuáció az azonos paraméterű méréseket tekintve. Előfordult, hogy két ugyanolyan, egymást követő mérés során akár  $15\text{-}20\%$ -os különbség is adódott a rács hőmérsékletében. A többi mérendő mennyiség esetében nem volt ilyen szintű bizonytalanság.

A kísérletek egy részénél külön levegőáramlást biztosítottunk egy változtatható teljesítményű porszívó segítségével, melynek adott fokozatban a légáramát úgy számítottuk ki, hogy felfűjtünk egy nagyobb műanyag zsákokat, majd rövid ideig kiszívtuk belőle a levegő egy kisebb részét. A zsákban lévő levegő térfogatváltozását úgy számítottuk ki, hogy a bekötözött műanyag zsákokat víz alá nyomtuk és a kiszorított víz mennyiségét mértük.

Az átáramlott levegő tömegét a gáztörvényből kaptuk [76]:

$$\Delta m_{\text{gáz}} = \frac{p \cdot M \cdot \Delta V}{R \cdot T}, \quad (7.4)$$

ahol  $M$  a levegő moláris tömege,  $R$  az egyetemes gázállandó és  $T$  a gáz abszolút hőmérséklete.

A levegő tömegárama:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m_{\text{gáz}}}{\Delta t}. \quad (7.5)$$

Feltételeztük, hogy a nyomás közel állandó, mivel csak kevés levegőt szívtunk ki; azaz elég volt a zsákok térfogatának megváltozását mérni. (A nyomást  $10^5$  Pa-nak vettük.)

A csőben áramló levegő átlagsebességét is meghatározhatjuk. Ha a cső keresztmetszetét és az áramlás sebességét állandónak tekintjük, kapjuk:

$$u_{\text{gáz}} = \frac{\Delta V}{S_{\text{cső}} \cdot \Delta t}, \quad (7.6)$$

ahol  $S_{\text{cső}}$  a cső belső keresztmetszetét jelenti,  $u_{\text{gáz}}$  pedig a csőben áramló levegő átlagsebessége.

A mérések során azt tapasztaltuk, hogy ha azonos égőteljesítmény mellett egy határon túl növeljük a melegítés időtartamát ( $t_m$ ) és nem hagyjuk kihűlni a Rijke-csővet, akkor a kibocsátott hang intenzitás szintje ( $L_I$ ) és időtartama ( $t_h$ ) is csökken, mivel a cső belseje egyre forróbb lesz, ezért egyre kisebb a hőmérsékletkülönbség a rács és a csővég között [B18].

A kísérletek során egyszerre csak egy paramétert változtattunk. Mivel a cső felforrósodása jelentősen befolyásolta a kapott hangintenzitás-szintet és hang hosszának értékét, ezért minden mérés után vártunk, hogy a rács és a cső visszahűljön nagyjából szobahőmérsékletre. A hűtés gyorsítására kipróbáltuk a gázfűtésű fém Rijke-csövek esetében a vízzel történő hűtést is. Az üvegből készült csövek esetében ezt nem lehet alkalmazni, mert könnyen elpattanhatnak a felforrósodott üvegcsövek. (Az elektromosan fűtött Rijke-csövek esetén szóba sem jöhet a vízhűtés alkalmazása a balesetveszély miatt.)

### 7.1.3. Küszöbhatás

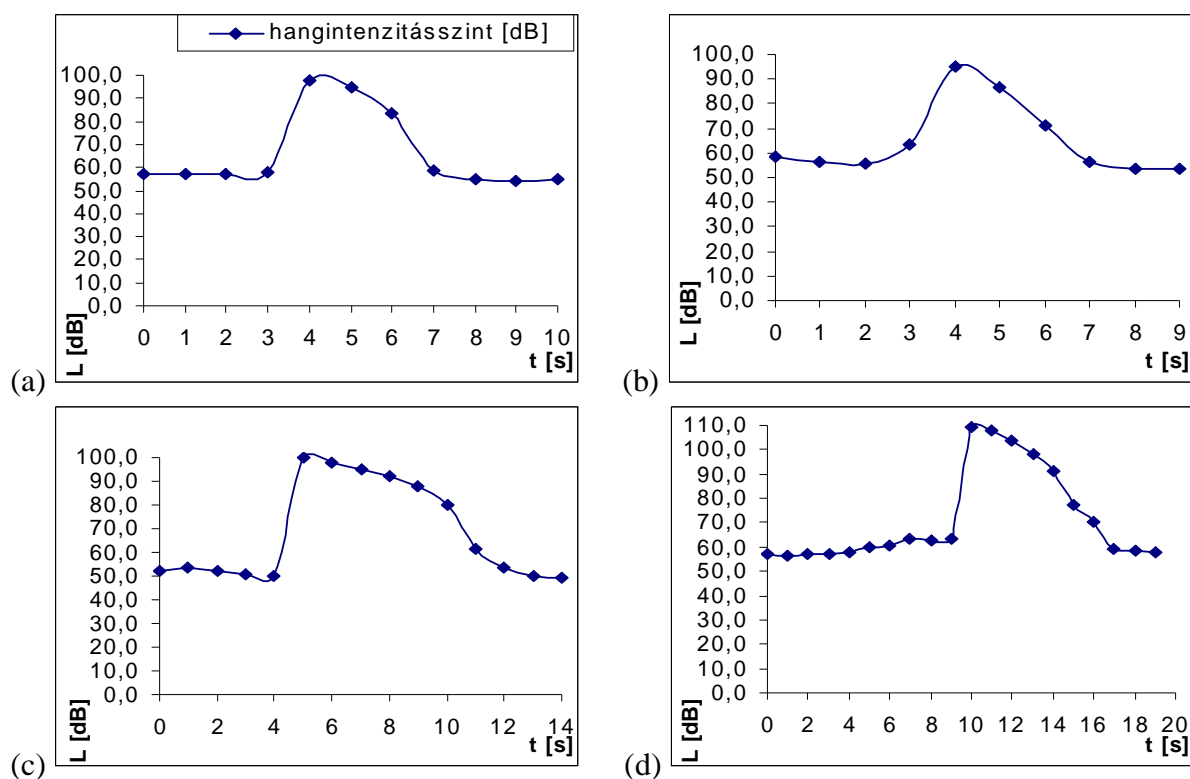
Alapesetben a Rijke-csövek függőleges helyzetben voltak. (A következőkben az  $L$  hosszúságú Rijke-cső hosszanti tengelyét  $x$  tengelynek nevezem. Az  $x=0$  a cső alját, az  $x=L$  a cső tetejét jelenti.) Egy adott cső esetén először a cső aljánál helyzetük el a rácsot, majd megadott teljesítménnyel a megadott ideig melegítettük a rácsot, kihúztuk a gázégőt és figyeltük, hogy keletkezik-e hang. Ezután a melegítés idejét növeltük (kb. másodperces ugrásokkal), majd ezt követően növeltük a gázégő teljesítményét is. Ha egy adott rácshelyzetnél megvizsgáltuk a különböző fűtőteljesítményekhez és fűtési időkhöz tartozó eseteket, akkor egy kicsivel feljebb toltuk a rácsot és előlről kezdtük a vizsgálatokat.

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 hosszának jól érzékelhető maximuma van, méghozzá közelítőleg akkor lesz a leghosszabb a kibocsátott hang, amikor a rács a melegítés során eléri a hőmérsékleti plató kezdetét.



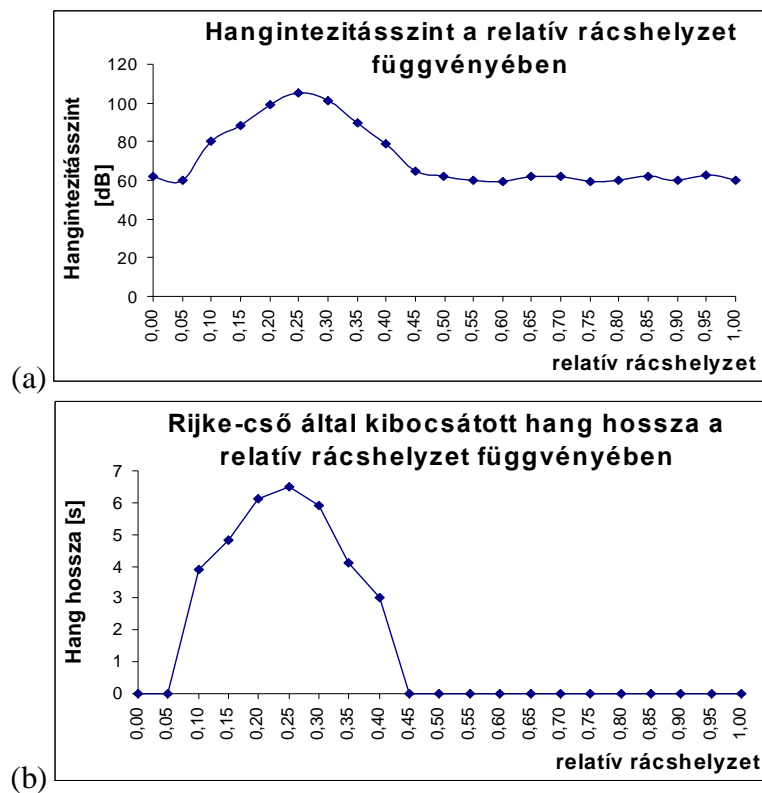
Hiába melegítjük tovább a rácsot, a kibocsátott hang már nem lesz hosszabb, sőt e pont után csökkenni kezd; azaz van egy optimális időtartam, amíg célszerű melegíteni a rácsot, ha az a célunk, hogy legtávolabbi hallható legyen a keletkezett hang. A kísérletek közben a csővég hőmérsékletét is mértük, és megállapítottuk, hogy a hangkibocsátás időtartama függ a rács és a csővég hőmérsékletének különbségétől [B16].

Különböző égőtéljesítmények esetén is vizsgáltuk a cső hangkibocsátását. Ebben az esetben a rács helyzete és áteresztőképessége nem változott. Minden fűtőtéljesítmény és minden rácshelyzet esetén mértünk meghatározott időtartamú melegítés után. A keletkezett hang időfüggésében 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 tekintve a cső alsó végétől indultunk és minden méréssorozat után fokozatosan egyre feljebb helyeztük el a rácsot (kb. 1–2 cm-es ugrásokkal). A kibocsátott hang hossza és intenzitása is fokozatosan nőtt, amíg el nem értünk a cső negyedrészének közelébe. Az  $x_r=L/4$  rácshelyzet körül található mind a hangintenzitásnak, mind a hang hosszának maximuma (7.3. ábra).



**7.3. ábra** A hang intenzitása és hossza az  $x_r=L/4$  rácshelyzetnél: (a) 400 mm hosszú üvegcső, égőtéljesítmény kb. 300 W; (b) rézcső, égőtéljesítmény kb. 340 W; (c) legrövidebb alumínium cső, égőtéljesítmény kb. 430 W; (d) 1200 mm hosszúságú alumínium cső, égőtéljesítmény kb. 510 W.

A kísérleteinkből kiderült – más kutatók eredményeivel megegyezően – hogy az összes csőnél a cső negyedrészéhez közel helyezett rács esetén keletkezik a legnagyobb intenzitású és a leghosszabb ideig hallható hang. Ha a rács pozícióját a csövek negyedrésznél feljebb helyeztük, akkor fokozatosan csökkentek mind a kibocsátott hang hosszának, mind intenzitásának értékei [B14, B15].



**7.4. ábra** Ha a relatív rácshelyzet  $x_r/L=0,25$ , akkor lesz a hangintenzitásnak és a kibocsátott hang hosszának is maximuma: (a) Hangintenzitás a relatív rácshelyzet függvényében; (b) Kibocsátott hang hossza a relatív rácshelyzet függvényében. (A kísérletek során 8 másodpercig melegítettük a rácst a 470 mm-es rézcsőben, az égőteljesítmény kb. 350 W volt. A kb. 60 dB-es hangintenzitás az alapzajnak felelt meg.)

A 7.4. ábrán látható kb. 60 dB-es hangintenzitás az alapzajnak felel meg, ugyanis a gázegőnek és a konvekciós áramlásnak is van hangja. Ha a Rijke-cső megszólalt, akkor a hangintenzitás legalább kb. 80 dB-re emelkedett, de gyakran 100 dB feletti értékeket is mértünk.

Ha a hangkibocsátást a gázegő teljesítményének függvényében jellemezzük, akkor küszöbszerű viselkedést tapasztalunk. Túlzottan kis teljesítmény esetén (közelítőleg  $P < 100\text{W}$ ) egyik cső sem szólalt meg. A legrövidebb üveg cső kb. 130 W, a legrövidebb alumínium cső 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 kb. 300 és 500 W közötti teljesítményt jelentett. Ha még tovább növeltük a teljesítményt, akkor egy idő után nemcsak hogy csökkent a hang hossza, hanem teljesen megszűnt a hangkibocsátás [B18].

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. A publikációk egy része azt állítja, hogy felső rácshelyzet esetén nem keletkezhet hang a Rijke-csőben. A legtöbb cső esetén valóban nem tapasztaltunk hanghatást felső rácshelyzet esetén. A 768 mm hosszúságú alumínium cső esetén viszont néhány esetben mégis keletkezett hang, annak ellenére, hogy a rácst a cső felső felében helyezkedett el ( $x_r=0,65L$  környékén).

Előfordult olyan eset, amikor csak halkán lehetett hallani a kibocsátott hangot (kb. 75 dB volt az intenzitásszint), de néhány esetben a cső egy nagyobb intenzitású (kb. 90 dB), rövid ideig tartó (kb. 1,5–2,5 s) hangot bocsátott ki. Sajnos a jelenség nem volt jól reprodukálható, azaz csak néhányszor sikerült megszólaltatni a csövet, de a legtöbb esetben nem. Szerencsére számítógéppel rögzítettük, ezért később elemezni tudtuk a hangot.

### **Vízszintes helyzetű Rijke-cső**

Ha a csövet vízszintes helyzetbe fordítjuk és megpróbáljuk a rácsot lánggal melegíteni, akkor alapesetben nem keletkezik hang; nincs a levegőnek természetes konvekciós áramlása, úgy is mondhatjuk, hogy nem működik a kéményhatás, ezért nyomásfluktuáció sem alakul ki. Ekkor semmilyen rács helyzet és semekkora égőtéljesítmény esetén sem bocsát ki hangot a cső. Más a helyzet, ha külön légáramlást biztosítunk a csőben, pl. egy porszívóval szívjuk a csőben a levegőt. Ekkor már keletkezik hang, méghozzá nagyjából hasonlóan ahhoz, ahogy a cső függőleges helyzetben viselkedik. Ekkor is  $x_r=L/4$  helyzet közelében van a rács optimális helyzete. (Elméletben a levegő fűjásával is próbálkozhattunk volna, de ez túl komplikált lett volna, ezért nem próbáltuk ki.)

Vízszintes cső esetében is van küszöbhatás. Ezt úgy tudtuk demonstrálni, hogy állandó értékű égőtéljesítmény esetén a porszívó szívásteljesítményét fokozatosan növeltük a kísérletek során, így a Rijke-csőben áramló levegő tömegárama is fokozatosan növekedett. A cső kezdetben nem bocsátott ki hangot, de egy idő után már elegendő volt a légáram, és megszólalt a Rijke-cső.

A porszívó meglehetősen hangos volt, ezért a hangintenzitás-szint mérésekben a porszívó hangja dominált, de észrevehetőek voltak a Rijke-cső megszólalásakor a hangintenzitásszint csúcsok. A porszívó bekapcsolásával az alap hangintenzitásszint kb. 80 dB-re növekedett, de a Rijke-cső megszólalásakor közel ugyanakkora volt az intenzitásszint, mint a függőleges helyzetű csőben porszívó nélkül (kb. 100 dB).

Vízszintes csőhelyzet esetén is tapasztaltuk, hogy még az optimális ( $x_r=L/4$ ) rács helyzet esetén is jelentkezik a felső küszöbhatás [B16, B18]. Ha a teljesítményt növeltük, miközben a levegő tömegáram maximális volt egy bizonyos érték felett már nem szólalt meg a cső. Ez a felső küszöbteljesítmény függött attól, hogy melyik csővel kísérleteztünk. Összefoglalóan elmondható, hogy vízszintes csőhelyzet esetén is mind alsó, mind felső küszöb jelentkezik a hangkibocsátásban. Ez függ a gázégő teljesítményétől, a csővön átáramoltatott levegő tömegáramától, illetve a rács helyzetétől is.

## **7.2. Termoakusztikus oszcilláció**

Az eddigiekben bemutattam a gázlángos kísérleteink eredményeit. A tanulókkal közösen megpróbáltunk egyszerű, középiskolai szinten is megérthető magyarázatot adni a megfigyelt jelenségekre [B18].

A függőleges Rijke-cső esetében a felforrósított rács közelében a levegőben a sűrűségcsökkenés következtében természetes konvekciós áramlás indul meg. A cső aljánál és tetejénél a nyomáskülönbség és a cső keresztmetszetének szorzata nagyobb, mint a térfogatrészben lévő levegő súlya. (A jelenséget kéményhatásnak is nevezik.)

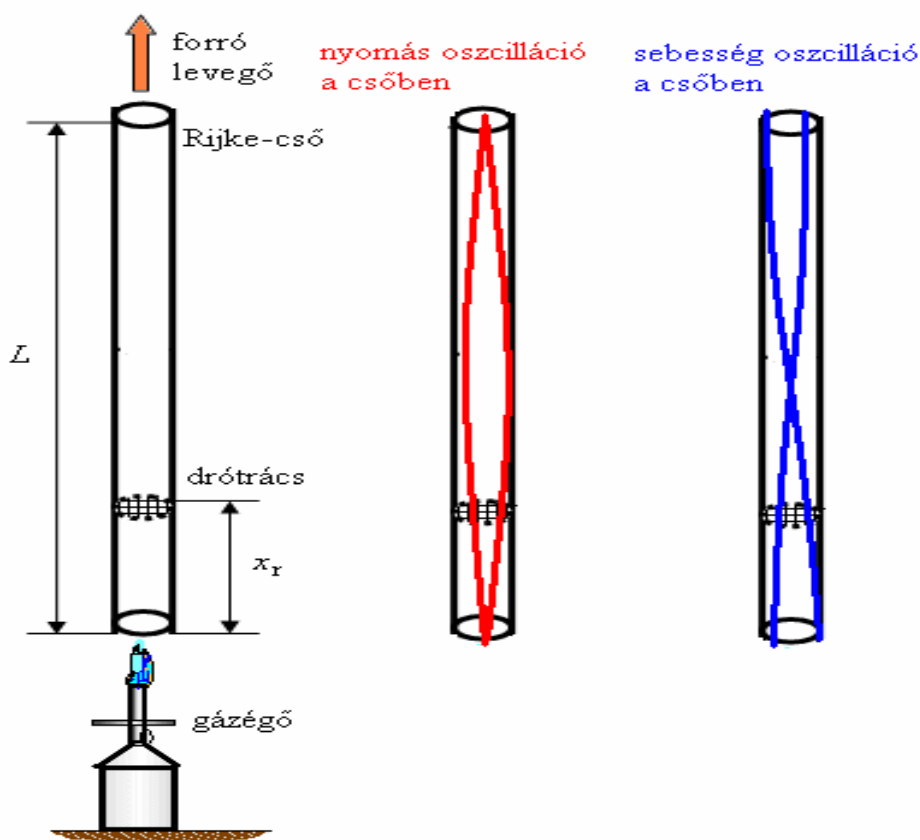


A gázláng által felforrósított rács körül a levegő hőmérséklete emelkedik, így növekszik a nyomás és a sebesség is; a felmelegedett gáz tágul, a sűrűsége csökken; a levegő a csőben felfelé áramlik.

### 7.2.1. Állóhullámok a csőben

Egy mindkét végén nyitott csőben energiaközlés hatására akusztikus állóhullámok alakulhatnak ki. (Az állóhullám két, ellentétes irányban haladó longitudinális hanghullám eredője.) A gáz a cső minden részén váltakozva összenyomódik és kitágul. Álló hanghullámok kelthetők a csőben olyan energiaforrás segítségével, aminek a teljesítményét a hang modulálni képes. Ha az energiaközlés megszűnik, akkor az előzőleg keltett hang előbb-utóbb megszűnik, mivel súrlódás lép fel a cső falánál és energia távozik a cső végénél is [87].

A Rijke-csőben keletkező állóhullámok esetén a nyomásfluktuációnak ( $p'$ ) csomópontja van a cső végeinél, ugyanitt a sebességfluktuációnak ( $u'$ ) duzzadóhelye van; a nyomásfluktuációnak duzzadóhelye van a cső közepénél, ugyanitt a sebességfluktuációnak csomópontja van (7.5.ábra). A fűtött rács közelében az akusztikus nyomásban, a sebességben és a hőmérsékletben is van valamekkora ugrásszerű változás, de ezt most elhanyagoljuk az egyszerűség kedvéért.



7.5. ábra A Rijke-csőben az akusztikus nyomás és sebesség szemléltetése (alapharmonikus eset).

Ha a gázban a nyomás vagy sűrűség valahol eltér az egyensúlyi értéktől, akkor ez a zavar a gázban hullámszerűen tovaterjed. A jelenséget hangnak nevezzük. Gázokban a hang mindig longitudinális hullám.

A csőben a hang síkhullámmal közelíthető, a cső szájától távolodva egyre jobban közelít egy gömbhullámot. Első közelítésben tekintsünk el attól, hogy a levegő áramlik a csőben! A hullámeqyenletet megoldása a nyomás esetén [76]:

$$p' = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) + A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + k \cdot x + \delta), \quad (7.7)$$

ahol  $p'$  a nyomásfluktuáció,  $\omega = 2\pi \cdot f$  a körfrekvencia,  $k = \omega/v_h$  a hullámszám, és  $v_h$  a hangsebesség.

Meghatározzuk  $\delta$  lehetséges értékeit. A cső elején ( $x=0$ ) a hangnyomásnak csomópontja van:

$$0 = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta) \quad (7.8)$$

A (7.8) egyenletben alkalmazzuk a trigonometrikus összefüggéseket:

$$0 = \sin(\omega \cdot t) \cdot (A_1 + A_2 \cdot \cos(\delta)) + A_2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(\delta) \quad (7.9)$$

A (7.9) egyenlőség tetszőleges időpillanatban fennáll. A  $\cos(\omega \cdot t)$  együtthatója vagy akkor tűnik el, ha  $A_2=0$ , vagy akkor, ha  $\sin(\delta)=0$ . Az előző esetben azonban  $\sin(\omega \cdot t)$  együtthatója csak  $A_1=0$  esetben tűnhetne el, ami azt jelenti, hogy  $A_1=A_2=0$ , azaz nincs hang. Marad tehát  $\sin(\delta)=0$ . Ebből az következik, hogy  $\delta = n \cdot \pi$ . Ezt behelyettesítve a  $\sin(\omega \cdot t)$  együtthatójának eltűnését kifejező  $A_1 + A_2 \cdot \cos(\delta) = 0$  egyenletbe  $A_1 + A_2 = 0$  adódik (páros  $n$  esetén), vagy  $A_1 - A_2 = 0$  adódik (páratlan  $n$  esetén). A  $\pi$  fázistolás előjelváltással egyenértékű, a két eset ugyanarra vezet. A két nyomáshullám egymással szemben halad azonos nagyságú amplitúdóval ( $A$ ).

A (7.7) egyenletben alkalmazzuk a trigonometrikus összefüggéseket:

$$p' = A \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(k \cdot x) - A \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(k \cdot x) + \\ - A \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(k \cdot x) - A \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin(k \cdot x). \quad (7.10)$$

Az egyszerűsítés után kapjuk:

$$p' = -2 \cdot A \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad (7.11)$$

A cső végén ( $x=L$ ) a hangnyomásnak csomópontja van ( $p'=0$ ). Mivel tetszőleges időpillanatban fennáll az egyenlőség, ezért írhatjuk:

$$\sin(k \cdot L) = 0, \quad (7.12)$$

azaz

$$k \cdot L = n \cdot \pi, \quad (7.13)$$

ahol  $n$  tetszőleges pozitív egész szám lehet.

Mivel fél hullámhossznyi távolságonként helyezkednek el a csomópontok, és a cső elején és végén is csomópont van, ezért a cső hossza a hullámhossz felének egész számú többszöröse.

A hang hullámhossza:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n}. \quad (7.14)$$

A hang frekvenciája [98]:

$$f = \frac{k}{2 \cdot \pi} \cdot v_h = \frac{v_h}{\lambda} = \frac{v_h}{2 \cdot L} \cdot n, \quad (7.15)$$

ahol  $v_h$  a hangsebesség,  $n$  a harmonikusok száma, az elsőt ( $n=1$ ) alapharmonikusnak nevezzük.

A csövek által kibocsátott hang frekvencia spektrumát Audacity programmal vizsgáltuk. (A részleteket a következő részfejezetben írom le.) Az egyszerűsített modell alapján kiszámított frekvenciák akár 5-8%-kal is eltértek a mért frekvenciáktól, ezért a modellünket finomítottuk.

### Hanghullámok az áramló levegőben

Ha figyelembe vesszük, hogy a csőben áramló levegőben alakulnak ki a hanghullámok, akkor a nyomáshullámra a következő egyenletet írhatjuk:

$$p' = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) + A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + k_2 \cdot x + \delta). \quad (7.16)$$

A levegő áramlása miatt az áramlás irányában, illetve azzal ellentétes irányban a hullámszámok kicsit különböznek. (Az áramlás miatt a két ellentétes irányban haladó hullámnak nem azonos a hullámhossza.)

Az áramlás irányában haladó hullám hullámszáma:

$$k_1 = \frac{\omega}{v_h + u}, \quad (7.17)$$

az ellentétes irányban haladó hullám hullámszáma:

$$k_2 = \frac{\omega}{v_h - u}, \quad (7.18)$$

ahol  $v_h$  a hangsebesség,  $u$  az áramló levegő sebessége. Feltételezzük, hogy az áramlás szubszonikus, azaz  $u < v_h$ .

A cső elején ( $x=0$ ) a hangnyomásnak csomópontja van:

$$0 = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) - A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta). \quad (7.19)$$

A (7.8) egyenlet megoldásánál alkalmazott gondolatmenethez hasonlóan láthatjuk be, hogy a két nyomáshullám most is egymással szemben halad azonos nagyságú amplitúdóval ( $A$ ).

Alkalmazzuk a trigonometrikus összefüggéseket a (7.16) egyenletre! Az azonos nagyságú amplitúdók miatt írhatjuk:

$$\begin{aligned} p' &= A \cdot (\sin(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) - \sin(\omega \cdot t + k_2 \cdot x)) = \\ &= -2 \cdot A \cdot \sin\left(\frac{k_1 + k_2}{2} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{k_2 - k_1}{2} \cdot x\right). \end{aligned} \quad (7.20)$$

A Rijke-csőben áramló levegőben a nyomáshullám nem egy tiszta állóhullám. Egy szinuszfüggvény burkolójú haladó hullámról beszélhetünk; a haladó hullám visszafelé, a gáz áramlásával ellentétes irányban halad.

A cső végén ( $x=L$ ) a hangnyomásnak csomópontja van ( $p'=0$ ). Mivel tetszőleges időpillanatban fennáll az egyenlőség, ezért írhatjuk:

$$\frac{k_1 + k_2}{2} \cdot L = n \cdot \pi, \quad (7.21)$$

ahol  $n$  tetszőleges pozitív egész szám lehet.

## A hang frekvenciájának vizsgálata

A tanulókkal megvizsgáltuk a Rijke-csőekben kialakuló hang frekvenciáját. A cső gerjesztésekor megszólaló hangot a mikrofon és a számítógép segítségével rögzítettük, majd hangelemző szoftverrel elemeztük; illetve a (7.15) képletből kiszámítottuk a frekvenciákat. A mért és a számított frekvenciák között néha 5-8% különbség is volt, ezért finomítottunk az egyszerű modellen. A (7.17), a (7.18) és a (7.21) egyenletek alapján írhatjuk:

$$\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{v_h + u} + \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{v_h - u} \cdot L = n \cdot \pi. \quad (7.22)$$

Rendezés után kapjuk:

$$f = \frac{v_h^2 - u^2}{2 \cdot v_h \cdot L} \cdot n. \quad (7.23)$$

A vizsgálatainkban az áramlás sebessége legfeljebb néhány m/s érték. A (7.23) alapján kapott frekvenciák az egyszerű modell alapján kapott frekvenciáktól (7.15) kicsit kisebbek.

Az egyszerű modellhez képesti frekvenciák eltolódásának egyéb okai is vannak. Levine és Schwinger vizsgálatai alapján a hangnyomásnak nem pontosan a cső két végén van a csomópontja, hanem a cső végeitől kicsit távolabb; ezt egy korrekciós taggal lehet figyelembe venni, ami a Rijke-cső sugarától függ. A cső végeinél a korrekciós tag értéke  $0,61 \cdot R_{cső}$  [99]. A további számításainkhoz a korrigált csőhosszat használtuk. A hang frekvenciája:

$$f = \frac{v_h^2 - u^2}{2 \cdot v_h \cdot L'} \cdot n. \quad (7.24)$$

ahol  $L' = L + 2 \cdot 0,61 \cdot R_{cső}$  a cső korrigált hossza [99].

A hangsebesség függ a hőmérséklettől [100]:

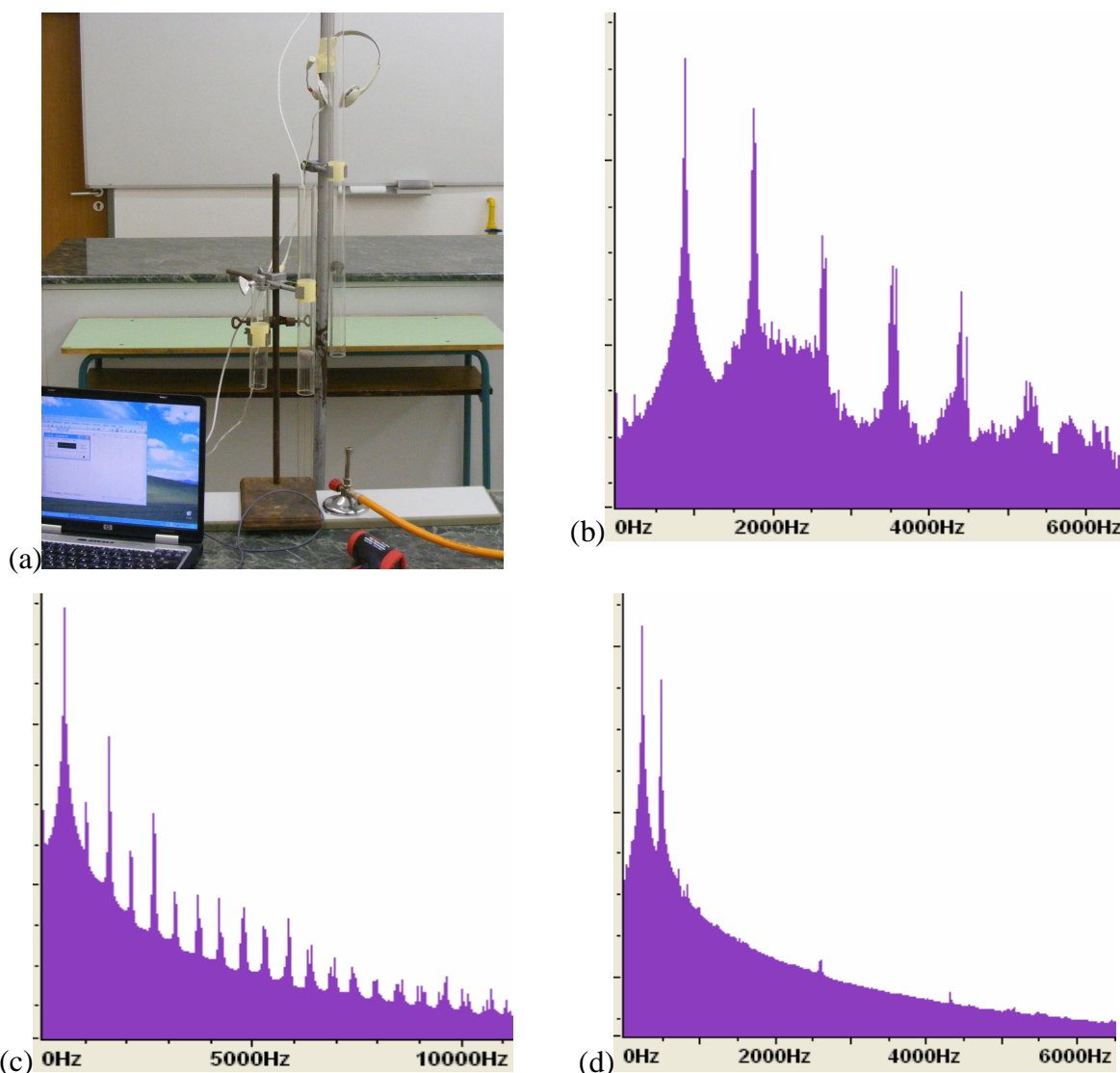
$$v_h = \sqrt{\left(\frac{c_p}{c_v} - 1\right) \cdot c_p \cdot T}, \quad (7.25)$$

ahol  $c_p$  a levegő állandó nyomáshoz,  $c_v$  a levegő állandó térfogathoz tartozó fajhője,  $T$  pedig a levegő abszolút hőmérséklete. (A fajhők is függenek a hőmérséklettől, ezért mindig a csőbéli átlaghőmérséklethez tartozó fajhőkkel számoltunk.) A kísérletek során több pontban mértük a csövek belsejében hőmérsékletet és az átlaghőmérséklet segítségével számoltuk ki a hangsebességet, majd a frekvenciát.

A cső hossza és a kialakuló hang frekvenciája közötti kapcsolat bemutatására kiválóan megfelelt a 3 üvegcső, mert hosszai aránya 1:2:4. A csövek által kibocsátott hang frekvencia spektrumát Audacity 1.4 (freeware) programmal vizsgáltuk [101]. A program grafikus formában jeleníti meg a felvett hang spektrumát. A grafikonok elemzéséből kiderült, hogy a 200 mm hosszúságú üvegcsőnek a legerőteljesebben megszólaló frekvenciája 902 Hz, a korrigált képletek alapján számított frekvenciája 911,7 Hz. A 400 mm hosszúságú üvegcső esetén az alapharmonikus mért értéke 467 Hz, számított érték 471,2 Hz. A 800 mm hosszúságú cső esetén a mért frekvencia 233 Hz, a számított érték 235,7 Hz.

Látható, hogy jól közelítenek egymáshoz a mért és a számított alapfrekvenciák értékei. A legrövidebb cső esetén a relatív hiba 1,1%, a középső cső esetén a relatív hiba 0,9%, a leghosszabb cső esetén a relatív hiba 1,1%. A korrigált számítások és a mérések eredményei már összhangban voltak egymással, ami megerősítette a tanulókat a munkájuk hasznosságának megítélésében.

A 7.6. ábra elemzéséből az is kiderül, hogy az alapharmonikus mellett az első néhány felharmonikus szólal meg nagyobb intenzitással, a magasabb felharmonikusok ( $n > 5$ ) intenzitása kevésbé jelentős. A gerjesztés módjától függ, hogy melyik harmonikus milyen intenzitással szól. (Egyszerre több módus gerjesztése is lehetséges.)



**7.6. ábra** A Rijke-cső által kibocsátott hang spektruma (relatív egységekben): (a) 3 darab üvegcső; (b) 200 mm hosszúságú cső spektruma; (c) 400 mm hosszúságú cső spektruma; (d) 800 mm hosszúságú cső spektruma.

A függőleges csőben a levegő mozgása két részből tevődik össze. A gázláng hatására felforrósodott levegő kitágul, sűrűsége csökken, és felfelé kezd áramlani. Ehhez járul még a kialakuló hullám [87].

A keletkezett hang hatására a rácson keresztülráamló levegő sebessége oszcillál, a hőátadás is oszcillál kb.  $\pi/2$  fáziskéséssel az áramlási sebesség oszcillációjához képest. A hanghatás fennmarad, de csak addig, amíg a rendszerből folyamatosan távozó energia miatt a folyamat le nem áll. Az energia veszteségek miatt a hanghatás néhány másodperc múlva megszűnik [87].

A hőátadás a forró rác és az áramló levegő között az akusztikus ciklus egyik felében nem ugyanakkora, mint a ciklus másik felében [87]. A hőteljesítményt ( $\dot{Q}$ ) két részre oszthatjuk, egy átlagos részre ( $\dot{Q}_0$ ) és egy időben fluktuáló részre ( $\dot{Q}'$ ); az időben változó rész egy periódusidőre vett időbeli átlaga nulla [87]:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 + \dot{Q}'. \quad (7.26)$$

Hasonlóképpen a nyomás ( $p$ ) a csőben szintén két részre bontható [87]:

$$p = p_0 + p', \quad (7.27)$$

ahol  $p_0$  az átlagos nyomás,  $p'$  az időben változó komponens.

Az oszcillációs nyomásnak ( $p'$ ) a cső nyitott végeinek közelében minimális az értéke. (A  $p'$  értéke az  $x=0$ , illetve az  $x=L$  hely közelében zérus.)

A csőben áramló levegő sebessége ( $u$ ) is két részből tevődik össze [87]:

$$u = u_0 + u', \quad (7.28)$$

ahol  $u_0$  az átlagos sebességet,  $u'$  pedig az időben változó részt jelöli.

A forró rác és a rajta keresztülráamló levegő közötti hőteljesítmény értékét [95] és [102] alapján számíthatjuk:

$$\dot{Q} \approx \left( \frac{T_r}{T_{l0}} - 1 \right) \cdot \frac{v_h^2 \cdot S_r \cdot \eta \cdot \text{Re}^{0.5}}{(\kappa - 1) \cdot D_r \cdot \text{Pr}^{0.6}}, \quad (7.29)$$

ahol  $T_r$  a rác hőmérséklete,  $T_{l0}$  a rácson keresztülráamló levegő átlagos hőmérséklete,  $\kappa=c_p/c_v$  az adiabatikus gáz konstans,  $S_r$  a rác (drót darabkái) által lefedett tényleges terület,  $\eta$  a levegő dinamikai viszkozitása,  $D_r$  a rácsot alkotó drótok átmérője (feltételezzük, hogy a drótok kör keresztmetszetűek),  $\text{Pr}$  a Prandtl szám,  $\text{Re}$  a rác átmérője szerinti Reynolds szám.

A dimenzió nélküli Reynolds szám [95, 103]:

$$\text{Re} = \frac{D_r \cdot u}{\nu}, \quad (7.30)$$

ahol  $\nu$  a levegő kinematikai viszkozitása ( $\nu=\eta/\rho$ ).

A dimenzió nélküli Prandtl szám [103]:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\chi}, \quad (7.31)$$

ahol  $\chi$  a levegő hővezetési együtthatója.

A rác és az áramló levegő közötti hőátadás függ az áramlás sebességétől; a fűtött rác melegíti az áramló levegőt, ami viszont hűti a rácsot; ráadásul a folyamathoz idő is szükséges, fáziskésés lép fel [104]. Lighthill megmutatta, hogy a sebesség-oszcillációhoz képesti fáziskésésnek alapvető szerepe van az akusztikus instabilitás kialakulásában [104].

A Rijke-csővet jellemző fizikai mennyiségek a sebesség ( $v'$ ), a nyomás ( $p'$ ) és a hőátadás fluktuáló része ( $Q'$ ). Az áttekinthetőség érdekében elhanyagoltuk a hangsebesség változását az áramlás következtében, és a hőátadásra pontosan  $\pi/2$  fáziskésést tételeztünk fel a sebességhez képest. A  $\pi/2$  fáziskésés a nagyobb frekvenciák tartományában ad jó közelítést. Kisebb frekvenciákon a fáziskésés  $\pi/2$ -nél kisebb értékű [76, 95, 100, 104].

A sebesség:

$$v' = v \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (7.32)$$

a nyomás:

$$p' = \rho \cdot v_h \cdot v \cdot \sin(k \cdot x) \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (7.33)$$

és a hőátadás fluktuáló része:

$$Q' = q \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}), \quad (7.34)$$

ahol  $v$  és  $q$  konstans amplitúdók,  $\rho$  a sűrűség,  $v_h$  a hangsebesség [76].

A hőátadás fluktuáló részére ( $Q'$ ) megadott képletnek akkor van értelme, ha  $x$  éppen a rács pozíciójával egyenlő, hiszen máshol nincs hőátadás. Ezzel szemben  $v'$ -nek és  $p'$ -nek más  $x$  értékekre is van értelme. A felsorolt mennyiségeket rögzített  $x$  mellett (a rács helyén) ábrázolhatjuk az idő függvényében.

### 7.2.2. Rayleigh-feltétel

Lord Rayleigh szerint, egy akusztikus ciklust tekintve, ha hőt közlünk ( $Q' > 0$ ) az összenyomási félperiódusban ( $p' > 0$ ); vagy hőt vonunk el ( $Q' < 0$ ) a tágulási félperiódusban ( $p' < 0$ ), akkor hanghullám kelthető, illetve tartható fenn [93].

Matematikai formában a Rayleigh-kritérium a Rayleigh-integrállal ( $I$ ) fejezhető ki [87]:

$$I = \frac{1}{T_c} \int_{t_0}^{t_0 + T_c} p' \dot{Q}' dt, \quad (7.35)$$

ahol  $T_c = 2\pi/\omega$  a periódusidő,  $p'$  a hangnyomás,  $\dot{Q}'$  a hőáram fluktuációja,  $t$  pedig az idő. (A középiskolások az egyszerűség kedvéért tekinthetnek az integrálra úgy, mint egy szummázásra, ahol a  $dt$  tulajdonképpen a nagyon-nagyon kicsi  $\Delta t$  időt jelenti.)

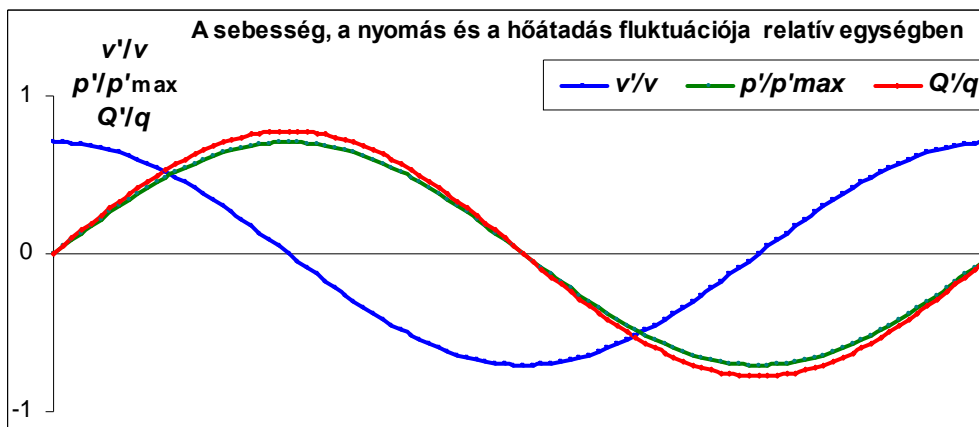
Sarpotdar és mtsai [87] szerint:

- Ha  $I < 0$ , akkor a hang gyengül;
- Ha  $I > 0$ , akkor a hang erősödik;
- Ha  $I = 0$ , akkor a hang nem erősödik, és nem is gyengül.

A csőben a gázláng által felforrósított rács nem egyenletesen melegíti a környezetét. A csőben áramló levegő periodikus mozgásának következtében a hőátadásban is periodikus jellegű fluktuáció figyelhető meg [87].

### Alsó rácshelyzet

A 7.7. ábrán a Rijke-csövet jellemző fizikai mennyiségek láthatók egy teljes periódusidőre, relatív egységekben, az  $x=L/4$  rácshelyzet esetén, az alpmódusra.



**7.7. ábra** A Rijke-csövet jellemző fizikai mennyiségek az idő függvényében, relatív egységekben az alpmódusra,  $x=L/4$  rácshelyzet esetén: sebesség ( $v'/v$ ), nyomás ( $p'/p'_{max}$ ), hőátadás fluktuációja ( $Q'/q$ ).

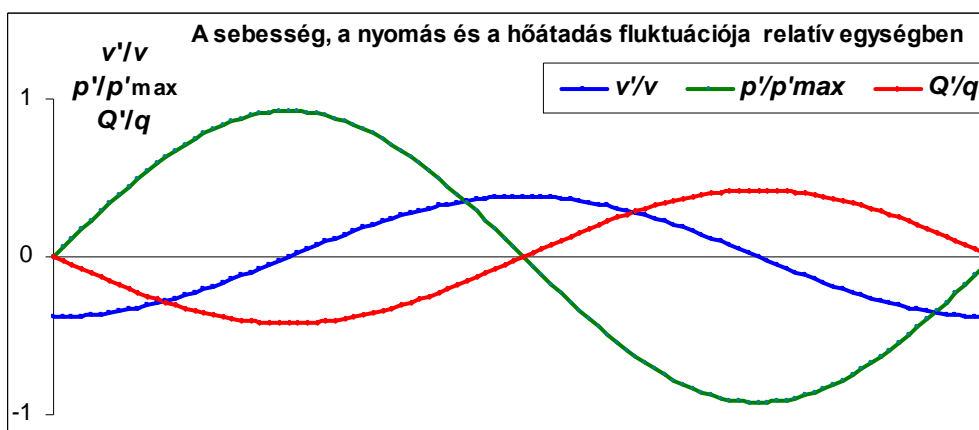
Ha a felforrósított rác a cső alsó felében van, akkor a hőátadás fluktuációja ( $Q'$ ) és a csőben lévő gáznyomás oszcillációja ( $p'$ ) azonos fázisban vannak az alpmódus esetén,  $I>0$ , lehetséges a Rijke cső gerjesztése. A cső alsó felében a nyomás  $\pi/2$  fáziskésésben van a sebességhez képest, akárcsak a hőátadás.

### Középső rácshelyzet

Ha a hőforrást a cső közepéhez helyezzük, akkor elméletileg sem erősítés, sem gyengítés sincs a hullámban ( $I=0$ ), a gyakorlatban mi sem tapasztaltunk hanghatást. Ennek oka, hogy a hőátadás fluktuációjának amplitúdója a sebesség rácsnál mért fluktuációjának amplitúdójával arányos, de az utóbbi a cső közepén eltűnik, ott a sebességnek csomópontja van.

### Felső rácshelyzet

A 7.8. ábrán a Rijke-csövet jellemző fizikai mennyiségek láthatók egy teljes periódusidőre, relatív egységekben, az  $x=5L/8$  rácshelyzet esetén, az alpmódusra.

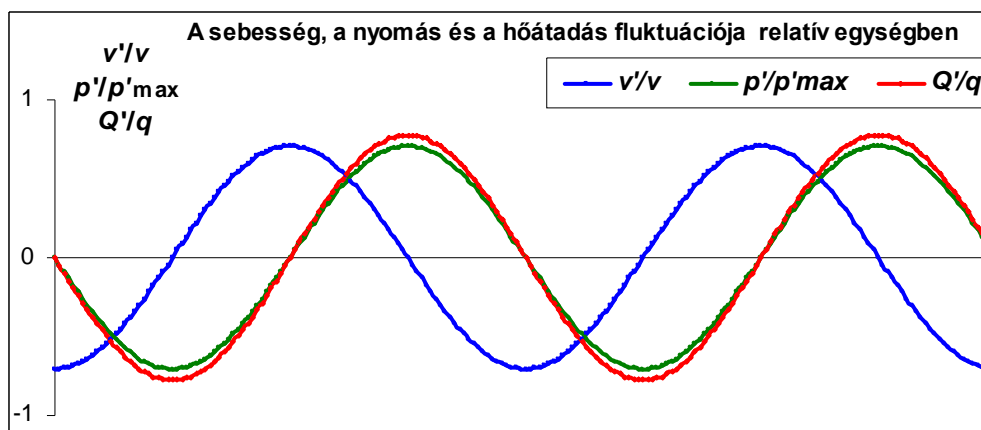


**7.8. ábra** A Rijke-csövet jellemző fizikai mennyiségek az idő függvényében, relatív egységekben az alpmódusra,  $x=5L/8$  rácshelyzet esetén: sebesség ( $v'/v$ ), nyomás ( $p'/p'_{max}$ ), hőátadás fluktuációja ( $Q'/q$ ).

Ha a felforrósított rác a cső felső felében van, akkor  $Q'$  és  $p'$  ellentétes fázisban vannak az alpmódus esetén, az nem gerjesztődik, ekkor  $I<0$ .



A 7.9. ábrán a Rijke-csövet jellemző fizikai mennyiségek láthatók relatív egységekben, az  $x=5L/8$  rácshelyzet esetén, a második módusra. A második módusban a frekvencia kétszeres az alapharmódushoz képest; azaz a periódusidő itt feleakkora, mint az alapharmódus esetén.



**7.9. ábra** A Rijke-csövet jellemző fizikai mennyiségek az idő függvényében, relatív egységekben a 2. módusra,  $x=5L/8$  rácshelyzet esetén: sebesség ( $v'/v$ ), nyomás ( $p'/p'_{\max}$ ), hőátadás fluktuációja ( $Q'/q$ ).

Ha a felforrósított rács a cső felső felében van, akkor  $Q'$  és  $p'$  azonos fázisban vannak a második módus esetén, az elméletileg gerjesztődhet, ekkor  $I > 0$  a második módusra.

Kisméretű hangforrás esetén a hang csillapodása a frekvencia 4. hatványával arányos [105]. A hang csillapodása tehát rohamosan növekszik a frekvenciával, a magasabb módusok gerjesztése ezért nehezebb. Felső rácshelyzet esetén csak a felharmonikusok gerjesztése lehetséges, ami sokkal nehezebb, nekünk is csak néhány esetben sikerült. Nehéz megtalálni felső rácspozícióban azt a lángteljesítményt, hogy valamelyik felharmonikus gerjesztődjön, de a rács még ne olvadjon szét.

### 7.2.3. A küszöbhatás magyarázata

A kísérletek során több paraméter esetén is küszöbszerű viselkedést tapasztaltunk, azaz csak bizonyos paraméter tartományokban sikerült a Rijke-csöveget megszólaltatni [B18].

A Rayleigh-kritérium szerint, ha  $I \leq 0$ , akkor vagy eleve nem is keletkezik hang, vagy, ha volt hang, akkor az gyengülni fog és megszűnik [87]. A veszteségek miatt módosítani kell a Rayleigh-kritériumot. A fűtésre van egy küszöbteljesítmény, ami alatt a hang meg se szólal, pedig a fázisok rendben vannak és  $I > 0$ . Igazából tehát csak egy küszöbérték felett számíthatunk hanghatásra, azaz, ha  $I > I_{\text{küszöb}} > 0$ .

#### Küszöbhatás a rácshelyzet esetén:

A függőleges Rijke-cső legaljához helyezett, felmelegített rács esetén a cső nem bocsát ki hangot. Ha a rácsot fokozatosan egyre feljebb toljuk, és kellően nagy hőteljesítményt alkalmazunk, akkor előbb-utóbb megszólal a cső. A cső negyedrésze tájékán van a hangintenzitás szint maximuma. Ha még feljebb toljuk a rácsot, akkor fokozatosan csökken a kibocsátott hang hossza és intenzitása is, a cső fele tájékán megszűnik a hanghatás.

A cső alsó felében minden pozícióban közel azonos a fázis, de a cső közepén a sebesség (és vele a hőátadás fluktuáló része) tűnik el, a cső elején pedig a nyomás. A különböző rácspozíciók esetében a visszacsatolás erőssége változik.

#### Küszöbhatás a rács áteresztőképessége esetén:

Különböző áteresztőképességű rácsokat is kipróbáltunk a kísérletek során. Sem a nagyon kicsi, sem a nagyon nagy áteresztőképesség esetén sem tapasztaltunk hanghatást.

A drótháló áteresztőképessége hatással van a csőben a légáramlásra és a hőátadásra is. Ha nagy a drótrács áteresztőképessége, ami akkor fordul elő, ha kicsi a drótháló felülete (azaz ritka a drótháló szövése), ilyenkor nagy lehet a levegő tömegárama, de kicsi az a felület, ahol a levegő érintkezik a fűtött drótokkal, ezért kisebb mértékű a háló és az áramló levegő közötti hőátadás.

Ellenkező esetben, ha kicsi a drótrács áteresztőképessége (sűrű a drótháló szövése), akkor kicsi a háló szabad légáteresztő felülete; ilyenkor nagy rácsfelület miatt nagyobb mértékű lehetne a háló és az áramló levegő között a hőátadás, de a levegő tömegárama kicsi, ezért mégsem tud a háló elég energiát átadni a levegőnek. Ezek alapján sem a nagyon ritka, sem a nagyon sűrű szövésű dróthálók sem felelnek meg.

#### Küszöbhatás a fűtési idő esetén:

Ha olyan rácspozícióban vagyunk, ahol a cső gerjeszthető, és csak 1–2 másodpercig melegítjük a rácso, majd a gázégőt visszahúzzuk, akkor nem bocsát ki hangot a cső. Ennek az oka az, hogy ilyenkor a rács nem tudott kellően magas hőmérsékletűre melegedni, ezért nem tud elég energiát átadni a környező levegőnek. Tapasztalataink szerint legalább kb. 3–4 másodperc melegítés szükséges a gerjesztéshez, és kb. 5–10 másodperces melegítés esetén lesz a hangintenzitás szint a maximum környékén, mert ilyenkor a rács kellően felforrósodik, a csőben lévő levegő és a cső viszont még nem lesz nagyon meleg, ezért nagy a hőmérséklet különbség a rács és a környezete között, ami növeli a hőátadás mértékét. Ha nagyon hosszú ideig melegítjük a rácso a csőben, majd visszahúzzuk a lángot, akkor nincs hangkibocsátás; ugyanis ebben az esetben gyakorlatilag az egész cső belsejében majdnem azonos a hőmérséklet, a rács nem tud jelentősebb mennyiségű energiát átadni a környezetének [B16, B18]. Alulról beáramlik hidegebb levegő a csőbe, de az áramló levegő a forró csőtől fokozatosan felmelegszik, a rácsnál már nem történik hirtelen felmelegedés, ami hangot keltene.

#### Küszöbhatás a fűtési teljesítmény esetén:

Ha olyan rácspozícióban vagyunk, ahol a cső gerjeszthető, és nagyon alacsony a fűtési teljesítmény, akkor a cső nem szólal meg, mivel a rács nem tudott kellően magas hőmérsékletűre melegedni. Fokozatosan növelve a fűtőteljesítményt eljutunk egy olyan küszöbértékhez, ahol a cső hangot bocsát ki. Ekkor már a rendszerbe bevitt energia elegendő ahhoz, hogy a rendszerből távozó energiát pótolja. Ha fokozatosan növeljük a hőteli teljesítményt, akkor eljutunk egy olyan tartományba, ahol a kibocsátott hang hossza és intenzitása is nagyjából maximális, ha viszont még tovább növeljük a fűtőteljesítményt, akkor a hang hossza és intenzitása is csökkenni kezd, majd eljutunk egy olyan pontra, ahol megszűnik a hanghatás.

Ennek oka vagy az, hogy a nagy hőteljesítmény hatására az egész cső felforrósodik, és szinte nincs hőmérséklet különbség a rács és a környező levegő között; vagy egyszerűen elolvad a rács, és megszűnik a hanghatást fenntartó energiaforrás [B18].

Felmerülhet, hogy esetleg a fűtési idő és a fűtési teljesítmény szorzata számít a küszöbhatás tekintetében. Természetesen számít, hiszen ez a rácsot fűtő hő. A vizsgálataink szerint azonban külön-külön is számítanak. Ha például nagyon kis teljesítménnyel, de nagyon sokáig fűtjük a rácsot, akkor a teljesítmény és a fűtési idő szorzata elegendően nagy lehet; mégsem szólal meg a cső, mert a cső belsejében nagyjából egyenletes, de nem túl magas lesz a hőmérséklet.

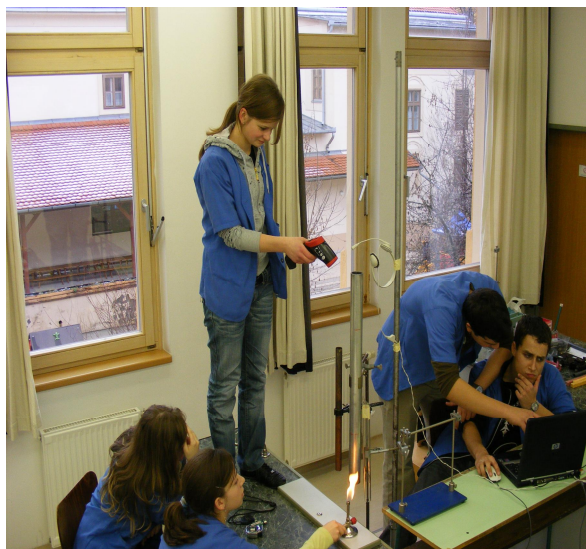
#### Küszöbhatás a levegő tömegáram esetén:

Függőleges és vízszintes cső esetén is jelentkezik a küszöbhatás. Ha nincs légáram, akkor nincs hanghatás sem. Ha a Rijke-csőben extra légáramot keltünk a porszívó segítségével, akkor a cső eleinte hangot bocsát ki; majd ha fokozatosan növeljük a levegő tömegáramát, akkor megszűnik a hang. Tehát a levegő tömegáram esetében is van alsó és felső küszöbérték a hanghatás kiváltásában.

Ezen jelenségeknek az a közös magyarázata, hogy a hanghatás fenntartásához szükség van légáramra természetes, vagy mesterséges formában. Ha ez a légáram hiányzik, akkor hiába közlünk hőt a ráccsal, az csak a közvetlen környezetének tudja az energiát átadni. (Most az egyszerűség kedvéért a hővezetés és a hőszugárzás hatását elhanyagoljuk.)

A rács közelében lévő levegő felmelegszik, de ezután a forró rács már nem tud több energiát átadni a környező forró levegőnek. A hang keltéséhez és fenntartásához folyamatos energia utánpótlásra lenne szükség, mivel a hanghullám – ha kialakul – energiája csökken a súrlódás és a csővégeken fellépő hangszugárzás következtében [87]. Ha tehát nincs légáram, akkor vagy nem keletkezik hang, vagy ha előtte volt hanghatás, akkor az hamarosan megszűnik. (A Rijke-cső ilyen szempontból hasonló egy fűvós hangszerhez, csak akkor szólalhat meg, ha megfelelő a légáram nagysága.)

A gázzal melegített Rijke-csövek vizsgálatát a projektünk első állomásának tekintettük. A 7.10. ábrán az iskolánk tanulói láthatók a projektfeladat közben.



**7.10. ábra** Iskolánk tanulói méréseket végeznek gázzal fűtött Rijke-csővel.

### 7.3. Elektromosan fűtött Rijke-cső vizsgálata

A gázlánggal melegített Rijke-csővel számos kísérletet végeztünk, hasznos adatokat gyűjtöttünk és ezek között összefüggéseket is észrevettünk (pl. küszöbhatás). Sajnos azonban az adataink nem voltak kellően pontosak ahhoz, hogy mélyebb összefüggéseket is vizsgálhassunk. Bizonyos törvényszerűségeket sejtettünk a vizsgálatokból, de nem tudtuk ezeket az összefüggéseket kimérni; ezért úgy döntöttem, hogy elektromosan fűtött Rijke-csővel folytatjuk a kísérleteinket, melyekben a hőforrás elektromos árammal fűtött drótrács lesz. Az áram teljesítményét könnyebben szabályozhatjuk, a fűtés során csak a rácsot melegítjük és egyszerűbb a hőteljesítmény mérése is, mint a gázláng esetén. A gázzal való fűtés esetén légáramlást okozunk, mely befolyással van a termoakusztikus instabilitásra; az elektromos fűtés esetében ez nem jelenik meg. A gázzal fűtött Rijke-csővek a kísérletek többségében függőleges helyzetben voltak, ekkor mindig volt valamekkora légáramlás a csőekben a természetes konvekció következtében. A vízszintes cső esetén nincs természetes konvekciós áramlás.

#### Függőleges helyzetű elektromosan fűtött Rijke-cső

A mérések során az elektromosan fűtött Rijke-csőket is vagy függőlegesen, vagy vízszintesen helyeztük el. Elsőként a függőleges esettel foglalkoztunk.

A korábbi mérések alapján láttuk, hogy a cső hangkibocsátását a cső geometriai paraméterei, a cső helyzete (vízszintes, vagy függőleges), a rács helyzete ( $x_r$ ), rácsra jutó hőteljesítmény ( $P$ ), a rács abszolút hőmérséklete ( $T_r$ ), a csövön átáramló levegő tömegárama ( $\dot{m}$ ), a fűtés időtartama ( $t_f$ ) és a rács átteresztőképessége határozza meg. Az elektromos fűtésű csővek esetén sokkal több időbe telt egy adott kísérleti elrendezés beállítása, mint gázfűtés esetén, illetve maga a mérés is jóval több időt vett igénybe. Egy adott mérés a beállításokkal együtt összességében jó néhány percig tartott. A 7.11. ábrán egy adott kísérleti elrendezés látható.



7.11. ábra Függőleges helyzetű elektromosan fűtött Rijke-cső.

Elsőként kidolgoztunk egy egyszerű modellt a függőleges helyzetű Rijke-csőben áramló levegő jellemzőinek modellezésére. Megvizsgáltuk azt az esetet, amikor nincsenek hanghullámok, ez a stacionárius alapáramlás. Az egyszerűsített modellszámításaink részletei megtalálhatók a függelékben. A legfontosabb megállapításaink a következők voltak:

- A cső alsó részében a hőmérsékletek, a sűrűségek és a sebességek a cső alsó nyílásánál, illetve a rács alatt közelítőleg megegyeznek.
- A cső felső részében a hőmérsékletek, a sűrűségek és a sebességek a rács felett, illetve a cső felső nyílásánál közelítőleg megegyeznek.
- A fűtött rácson való átáramláskor a levegő hőmérséklete és sebessége hirtelen növekszik, a sűrűsége viszont csökken.

### Vízszintes helyzetű elektromosan fűtött Rijke-cső

A termoakusztikus projekt utolsó részében vízszintes helyzetű, elektromosan fűtött Rijke-csővel foglalkoztunk. A vízszintes csőhelyzet előnye, hogy nem kell számolni a természetes légáramlással.

A kísérletsorozat elején még úgy gondoltam, hogy mindegyik korábban használt elektromos Rijke-cső viselkedését vizsgálni fogjuk a tanulókkal. Néhány mérést végeztünk is különböző csővekkel, de rá kellett jönnünk, hogy a részletes vizsgálatok túlzottan hosszú időt vennének igénybe; ezért úgy határoztunk, hogy a projektünk befejező szakaszában csak egy csővel fogunk méréseket végezni. A választás az 1200 mm hosszúságú alumíniumból készült Rijke-csőre esett. A projekt további részében a cső geometriai adatai tehát nem változtak.

A termoakusztikus rendszert jellemző paraméterek:

- A rács helyzete a csőben ( $x_r$ );
- A rács áteresztőképessége;
- A rácsra adott fűtőteljesítmény ( $P$ ), amelytől közvetve a rács hőmérséklete is függ ( $T_r$ );
- A melegítés (fűtés) időtartama ( $t_f$ );
- A csőben a levegő tömegárama ( $\dot{m} = \Delta m_{\text{levegő}} / \Delta t$ ).

A mérések során kiderült, hogy a vizsgálandó paraméterek számát csökkenteni lehet.

A vízszintes helyzetű, elektromosan fűtött Rijke-csővel végzett méréseink közben fedeztem fel, hogy már előttünk néhány évvel hasonló méréseket végeztek: Matveev 2003-ban egy ehhez hasonló, de professzionális kísérleti elrendezéssel vizsgálta a Rijke-cső viselkedését. A Matveev-féle kísérleti eszközt és mérőberendezéseket a Caltech Laboratóriumban (Kalifornia, USA) készítették [95].

Felmerülhet a kérdés, hogy ezek után volt-e értelme a munkánknak, hiszen az általunk készített eszközök Matveev vizsgálatainál egyszerűbb méréseket tettek csak lehetővé. Véleményem szerint a válasz igen. Az esetek többségében a középiskolában elvégezhető méréseknél sokkal precízebb méréseket végeznek különböző laboratóriumokban szakemberek.

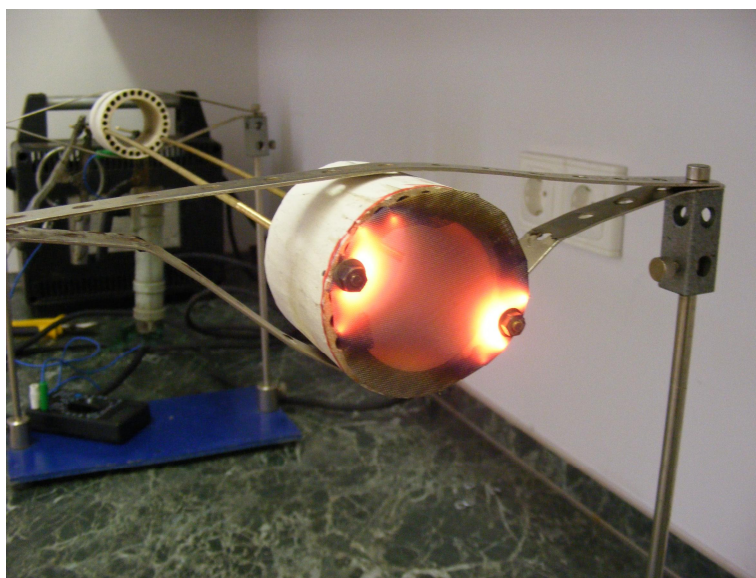


Ez alapján felesleges lenne az iskolákban méréseket végezni. Természetesen minden fizikatanár tudja, hogy szükség van akár általános-, akár középiskolában, sőt a felsőoktatásban is arra, hogy a tanulók, hallgatók tényleges fizikai méréseket végezzenek. A kísérletek, mérések szerves részét képezik a természettudományok tanulási (megismerési) folyamatának. A vizsgálatainkban nem az volt a cél, hogy Matveev méréseit pontosítsuk. Egyrészt az iskolai projekt előtt még nem is tudtam Matveev eredményeiről [95], másrészt mi a saját Rijke-csővünk viselkedésére voltunk kíváncsiak, harmadrészt a cél az volt, hogy a tanulók a mérések végrehajtását, az adatok gyűjtését, az adatok feldolgozását is gyakorolják.

### **A mérési elrendezés**

A vízszintes elhelyezkedésű Rijke-cső esetében egy porszívóval nekünk kellett légáramlást biztosítani a csőben, cserében viszont a természetes konvekcióval nem kellett foglalkoznunk. A porszívó által keltett levegő tömegáramát szabályozni tudtuk a porszívó teljesítményével, illetve a szívócsőbe helyezett fojtószelep segítségével; így viszonylag tág határok között szabadon tudtuk vizsgálni a levegő tömegáramának szerepét a rendszerben. A kísérleti berendezést úgy állítottuk össze, hogy maga a porszívó a szomszédos teremben (fizika-szertárban) volt, így a motor hangja kevésbé zavarta a kísérleteket [B19, B20].

A kísérleteinkhez végig egyféle dróthálót használtunk; a drótháló viszonylag sűrű szövésű kb. 0,45 mm átmérőjű, magas olvadáspontú acéldrótokból állt. Mivel a drótháló szövése egyenletes volt, ezért feltételeztük, hogy a felületén egyenletesen tudja leadni a hőt. A 7.12. ábrán az elektromos árammal fűtött rács látható, ami a kísérletek során a vízszintes Rijke-cső belsejében volt elhelyezve.



**7.12. ábra** Elektromos árammal fűtött drótháló.

A hálót egy hengeres kerámia betét tartotta a Rijke-cső belsejében a kívánt helyen. A kerámia betét hossza 65mm, belső átmérője 51 mm, külső átmérője 71,5 mm volt; pontosan beleillett az alumínium Rijke-cső belsejébe.

A kerámia betétben hosszirányban 5 mm átmérőjű furatok helyezkedtek el. A furatokat arra használtuk, hogy a bennük elhelyezett csavarokkal rögzítettük a dróthálót a kerámia betéten azért, hogy meggátoljuk a rács elmozdulását. Erre mindenképpen szükség volt, hiszen a rácsot elektromos szempontból el kellett szigetelni az alumínium csőtől. Ezen kívül a kerámia betét akadályozta a drótháló és a cső fala közötti termikus kölcsönhatást is; ez szintén hasznosnak bizonyult, hiszen a kísérletekben nem a cső felmelegítése volt a cél, hanem igazából a csőben áramló levegőt szerettük volna a rácsnál felmelegíteni [B20, B21].

A drótháló elektromos fűtéséhez szükséges áramot két sárgarézből készült pálcán keresztül vezettük a rácshoz a cső nyitott alsó vége felől. A rézpálcák hossza egyenként 1000 mm volt, az átmérőjük 4,5 mm. A rézpálcákat az előbb említett kerámia betét furatain keresztül vezettük, így elektromosan ezek is el voltak szigetelve a Rijke-csőtől.

A cső nyitott végénél – de a csövön kívül – még egy kerámia tubus volt, mely teljesen hasonló paraméterekkel rendelkezett, mint a másik kerámia betét. Ez a második betét csak arra szolgált, hogy megakadályozza, hogy a rézpálcák az alumínium csőhöz érjenek.

A kísérletekhez megfelelő feszültségforrást kellett találnunk, amely elegendően nagy áramerősséget biztosít ahhoz, hogy a dróthálót fel tudja izzítani. Az iskolában volt egy Trakis Hetra 101 SM típusú hegesztő transzformátor (névleges teljesítmény 4 kW, maximális áramerősség 100 A), illetve kipróbáltunk egy Weldi-MIG 322 típusú hegesztő berendezést is. A hegesztő berendezés szolgált tápegységül a kísérletekhez, melyek során mértük a rácson keresztül folyó áram erősségét és a rácson eső feszültséget. Valójában a rácson és a két rézpálcán eső feszültséget mértük, de a pálcák elektromos ellenállása kicsi a rács elektromos ellenállásához képest, ezért első közelítésben a pálcákon eső feszültséget elhanyagoltuk [B20, B21]. (A pontosabb számításoknál ezt is figyelembe vettük.)

A csőben a levegő áramoltatására egy ETA 3404 típusú ipari porszívót használtunk, ennek névleges teljesítménye 1,2 kW. A porszívó által keltett levegő tömegáramot a gázlángos kísérlethez hasonlóan számítottuk ki, annyi módosítással, hogy a szívócsőbe egy fojtószelepet is elhelyeztünk, így a levegő tömegáramát a zéró és a maximális érték között a rendszer többi paraméterétől függetlenül tudtuk beállítani. Ennek a porszívónak a legnagyobb szívási teljesítménye  $0,0026 \text{ m}^3/\text{s}$  (azaz kb. 3 g/s) volt normál körülmények esetén.

A szívócső nem közvetlenül kapcsolódott a Rijke-cső felső végéhez. Az alumínium cső vége egy  $450 \text{ mm} \cdot 450 \text{ mm} \cdot 500 \text{ mm}$  élhosszúságú, vastag falú kartondobozba nyílt. A doboz ezzel szemközti oldalában is volt egy kisebb átmérőjű nyílás, ide csatlakozott a szívócső. (A csatlakozási pontokat ragasztóval tömítettük.) A kartondobozra két okból volt szükség. Egyfelől a dobozba tettük a mikrofont, így csökkentettük a külső környezet zajhatását, azaz a mikrofon tényleg a rendszerünk akusztikai jeleit érzékelt; másfelől a kartondoboz egy csillapító kamraként funkcionált.

Ha ugyanis közvetlenül hozzákapcsoltuk volna a porszívót a Rijke-csőhöz, akkor ezzel a cső geometriai adatai módosultak volna. A csillapító kamrával viszont elértük, hogy a porszívó légáramlást tudott kelteni a Rijke-csőben, viszont Rijke-cső és a porszívó cső termoakusztikai szempontból jó közelítéssel függetlennek tekinthető [B19, B20]. Matveev a kísérleteiben szintén alkalmazott ehhez hasonló csillapító kamrát [95]. A kísérleteinkhez használt vízszintes helyzetű, elektromos árammal fűtött Rijke-cső és a hozzá kapcsolódó mérőeszközök a 7.13. ábrán láthatók.



**7.13. ábra** (a) Elektromos árammal fűtött, vízszintes helyzetű Rijke-cső; (b) Tanulói mérés.

A rács és a cső különböző pontjai hőmérsékletének mérésére IR-380 és IR-1000L típusú infrás hőmérőket alkalmaztunk. A melegítés időtartama bizonyos szempontból lényeges, más szempontból viszont kevésbé fontos. Ha elegendő időt hagyunk a rács felfűtésére és a rácsra jutó hőteljesítményt csak lassan növeljük, akkor a Rijke-cső nagyjából kvázi-stacionárius állapotokon keresztül jut el a gerjesztett állapotba, feltéve, hogy ez lehetséges [95]. Ha azonban hirtelen növeljük a teljesítményt, akkor a rendszerünk sokkal kiszámíthatatlanabban viselkedik; azaz mindig csak lassan szabad az elektromos fűtőtéljesítményt növelni; ezért magát a mérést mindig megelőzte egy felfűtési folyamat, csakúgy, mint Matveev esetén [95]. Ez a bemelegítési folyamat a kísérletek során általában néhány percig tartott. A melegítéshez szükséges időt empirikusan határoztuk meg; ha nem volt elegendő az egyik kísérletben, akkor egyszerűen tovább vártunk a következő mérés során. Ebből a szempontból tehát nem annyira fontos a rács felmelegítésének ideje, inkább csak az számít, hogy elegendően lassan melegítsük fel. Tehát ezt a paramétert nem kell mérni, csak megfelelő időt kell biztosítani a rács felfűtésére. Természetesen az is igaz, hogy csak véges idő áll rendelkezésünkre, ezért az sem jó, ha túlzottan lassan növeljük a fűtőtéljesítményt. A kísérletek során előbb-utóbb kitaláltuk, hogy milyen ütemben célszerű növelni a fűtőtéljesítményt [B21].



A kezdetben tervezett vizsgálandó paramétereiből tehát kiesett a rács átteresztőképessége és a melegítés időtartama. A rendszerünk stabilitását meghatározó 3 fontos paraméter Matveev vizsgálatai alapján [95]: a rács helyzete ( $x_r$ ), a csövön átáramló levegő tömegárama ( $\dot{m}$ ) és a rácsra jutó hőteljesítmény ( $P$ ). Ezeket a jellemzőket viszonylag pontosan meg tudtuk mérni, illetve ki tudtuk számítani. A fő célunk tehát annak meghatározása, hogy ez a 3 paraméter hogyan befolyásolja a rendszerünk termoakusztikai állapotát a stabilitás-instabilitás szempontjából.

### **A mérés menete**

A mérések menete nagyjából hasonló volt a gázlánggal fűtött vízszintes helyzetű Rijke-csővel végzett kísérleteinkhez. Az első lépés a rács pozíciójának beállítása a vízszintes csőben: a rácsot tartó kerámia betétet a cső alsó végéhez helyeztük – a 7.13. ábra alapján ez a cső bal végét jelentette – majd lépésenként toltuk előre a kerámia betétet a cső jobb oldali vége felé haladva. (Az egyértelműség kedvéért ezt neveztük a cső felső részének.)

Minden rácspozíció esetén nullától a maximális értékig változtattuk a csőben áramló levegő tömegáramát. A rácspozíció és a levegő tömegáram rögzítése után következett az elektromos fűtőteljesítmény fokozatos beállítása. A fenti paraméter-hármasok függvényében vizsgáltuk, hogy stabil-e a rendszerünk, vagy instabil állapotban van. Mindeközben figyeltük a rács hőmérsékletét, és ha megszólalt a cső, akkor mértük a hang intenzitását; a hang spektrumát FFT algoritmussal vizsgáltuk az Audacity program segítségével.

Ha a drótháló a cső felső részében helyezkedett el, akkor sokkal nehezebb volt a rendszert instabil állapotba hozni, mint ha a rács a Rijke-cső alsó felében lett volna. (A cső közepének tájékán nem találtunk olyan paraméter kombinációt, ahol a rendszer instabillá vált volna.) Az  $x_r=L/2$  rácspozíciót elhagyva azonban a rendszert mégis sikerült a stabil állapotából kimozdítanunk. Ezt azonban csak kb.  $0,6 \cdot L < x_r < 0,75 \cdot L$  tartományban figyeltük meg. Ha a cső 3/4-ét is elhagytuk, akkor egyetlen esetben sem észleltünk hangot, azaz ekkor a hőteljesítménytől, a melegítés időtartamától és a levegő tömegáramától függetlenül a termoakusztikus rendszerünk mindig stabil állapotban volt.

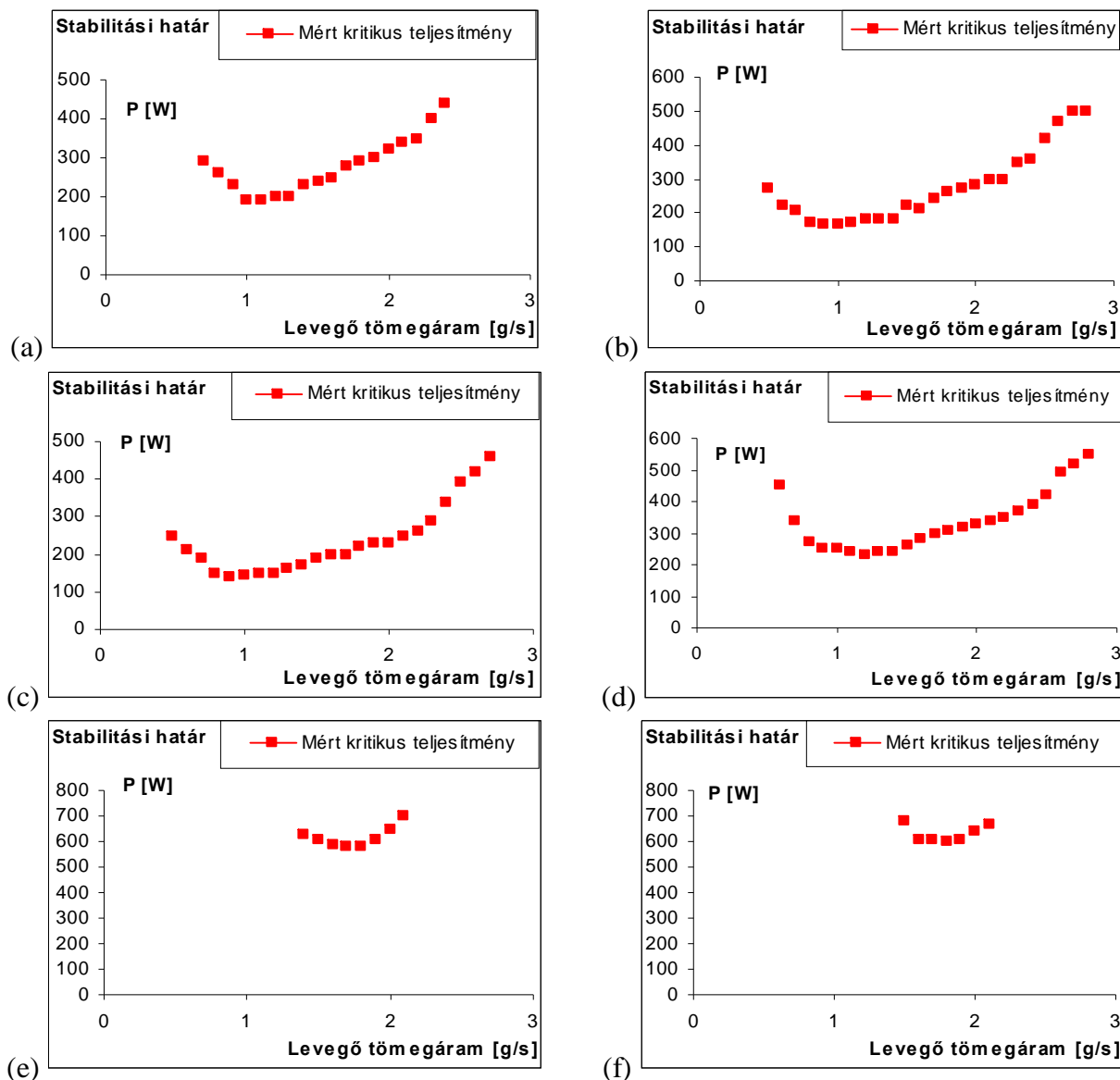
Néhány szerző már beszámolt a Rijke-csőnek az ún. 2. típusú gerjesztéséről pl. [95]. Matveev szerint az  $x_r=5L/8$  rácshelyzetnél van a cső 2. típusú gerjesztésében egy olyan pont, ahol a legintenzívebben gerjesztődik a rendszer [95].

### **A rendszer stabilitásának vizsgálata**

Az elsődleges célunk az volt, hogy meghatározzuk azokat a körülményeket, amelyek a termoakusztikus rendszert a stabilból a gerjesztett állapotba viszi. A csőben a 3 fő rendszerparamétert (rácspozíció, levegő tömegáram, hőteljesítmény) változtatva végeztük méréseinket. A tanulók a méréseket a vezetésem mellett hajtották végre: elsőként a rácspozíciót rögzítettük, majd beállítottuk a csőben áramló levegő tömegáramát, és ezután állítottuk be a dróthálót fűtő teljesítményt.

A Rijke-cső legkönnyebben akkor hozható instabil állapotba, ha a rács a cső negyedrésznél helyezkedik el [95]. Ekkor kell relatíve a legkisebb fűtőtéljesítményt a drótrácsra adni és viszonylag kis levegő tömegáram esetén is hangot bocsát ki a cső. Ha megvizsgáljuk, hogy az egyes levegő tömegáram értékek mellett mekkora az a legkisebb fűtési teljesítmény, amivel éppen gerjeszteni lehet a rendszerünket, és ezeket az összetartozó értékpárokat ábrázoljuk egy koordináta rendszerben, akkor a pontokat összekötve megkapjuk azt a határvonalat, ami a rendszerünk stabil állapotát az instabil állapotától elválasztja [95].

Ha a cső negyedrésznél helyezkedik el a rács, a stabilitási görbe minimumot mutat. Alacsony levegő tömegáram értékeknél meglehetősen magas hőteljesítménnyel lehet csak a rendszert gerjeszteni; ha növelni kezdjük a porszívóval a levegő tömegáramát, akkor csökken a gerjesztéshez szükséges minimális fűtőtéljesítmény. Tovább növelve a levegő tömegáramát eljutunk egy olyan ponthoz, ahol a legkisebb a gerjesztéshez szükséges hőteljesítmény. Ha még ezután is folytatjuk a levegő tömegáramának növelését, akkor fokozatosan egyre nagyobb fűtőtéljesítménnyel lehet csak a termoakusztikai rendszerünket instabil állapotba hozni.



7.14. ábra A cső gerjeszthetőségének határvonalai a mérések alapján:

(a)  $x_r=L/8$ ; (b)  $x_r=L/5$ ; (c)  $x_r=L/4$ ; (d)  $x_r=L/3$ ; (e)  $x_r=5L/8$ ; (f)  $x_r=2L/3$ .

Hasonló vizsgálatokat végeztünk más alsó rácspozíciók esetén is. A kapott eredményekből kiderült, hogy a rendszerünket jellegében hasonló határgörbe választja el a stabil és instabil állapotától. A gerjesztéshez nagyobb hőteljesítmények kellettek, mint az  $x_r=L/4$  rácspozíció esetén, azonos levegő tömegáram értékek mellett.

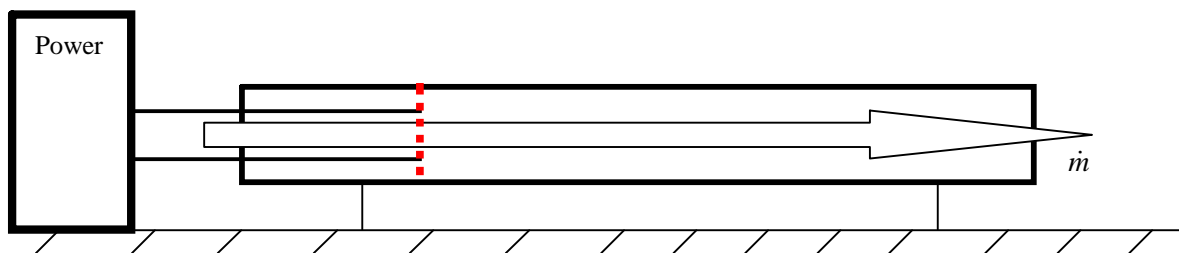
Azt tapasztaltuk, hogy alsó rácshelyzetek esetén mindig van egy olyan levegő tömegáram érték, amelynél a legkisebb hőteljesítménnyel gerjeszthető a rendszer [95]. Ha ettől az előbbi levegő tömegáramtól eltérünk akár pozitív, akár negatív irányba, akkor már csak nagyobb fűtőteljesítmény mellett lehet a Rijke-csövet instabil állapotba hozni (7.14. ábra).

A rendszer a második típusú gerjesztése esetén úgy viselkedik, hogy van egy olyan tartomány a fűtési teljesítményben és a levegő tömegáramban, ahol számíthatunk arra, hogy instabillá válik a rendszer. Sem a túl alacsony, sem a túl magas fűtőteljesítmény esetén sem szólal meg a cső, és ugyanez igaz a levegő tömegárammal kapcsolatban is [95].

### Vízszintes Rijke-cső termoakusztikus modellje

Ebben a részfejezetben bemutatom a Matveev-féle egyszerűsített modell főbb jellemzőit [95]. A projekt ezen befejező szakaszában már csak a legkitartóbb diákok vettek részt. Az elsődleges célunk az volt, hogy a fő rendszerparaméterek függvényében meg tudjuk mondani, hogy a termoakusztikus rendszer gerjeszthető-e. Összehasonlítottuk az elméletileg kapott eredményeket a kísérleti adatokkal, hogy lássuk, a modell milyen pontossággal írja le a valódi fizikai rendszert.

A rendszer modellje egy vízszintes cső, melyben elhelyezünk egy kis kiterjedésű, síknak tekintett hőforrást az  $x_r$  pontnál, és a csőben  $\dot{m}$  a levegő tömegárama [95]. A vízszintes helyzetű, elektromos árammal fűtött Rijke-cső vázlatát a 7.15. ábrán láthatjuk.



7.15. ábra Vízszintes helyzetű Rijke-cső egyszerű modellje.

A bemutatásra kerülő egyszerűsített modell Matveev [95] egyszerű modelljén (simple model) alapul. A modellben az alábbi feltételezéseket fogadjuk el [95 alapján]:

- A csőben áramló levegő tömegáramát állandó értékűnek tekintjük. A csőben a légáramot egydimenziósnek vesszük, csak lamináris áramlással foglalkozunk.
- A csőben csak lineáris folyamatok zajlanak.
- A csőben lévő levegő szinuszos rezgéseket végez, az ettől való eltérések kicsik, ezért azokat elhanyagolhatók.
- A gravitáció hatásával nem számolunk.

- A csőben áramló levegő (átlagos) sebessége kicsi a hangsebességhez képest, azaz kicsi a rendszert jellemző Mach szám. (A csőben áramló gáz sebessége és a hangsebesség hányadosát Mach számnak ( $M_a$ ) nevezzük, E. Mach osztrák fizikus nevééről. Ha ez a szám jóval kisebb egynél, akkor a csőben a légáramlást szubszonikusnak nevezzük. Ennek azért van jelentősége, mert kis  $M_a$  értékek mellett sokkal egyszerűbbek a gáz áramlását leíró törvényszerűségek.)

## A rendszer elemzése

A projektben a tanulókkal áttekintettük a rendszer jellemzésére szolgáló alapegyenleteket. Ezek között olyanok is szerepeltek, amelyek nem részei a középiskolai fizika tananyagának, a matematikai bonyolultságuk miatt. Ezekkel az összefüggések csak annyiban foglalkoztunk, hogy a modell megértését elősegítse. A részleteket korábban már bemutattam [B19, B20, B21, B22]. A dolgozatban a kritikus teljesítmény meghatározásának csak a legfontosabb lépéseit ismertetem.

Az egyszerűsített modellben azt feltételezzük, hogy az  $n$ -ik akusztikus módusban a körfrekvencia ( $\omega_n$ ) az alapharmonikus körfrekvenciájának  $n$ -szerese [95]:

$$\omega_n = \omega \cdot n = v_h \cdot k_n, \quad (7.36)$$

ahol  $v_h$  a hangsebesség és  $k_n$  a hullámszám.

Az egyszerűsített modellben az energiamegmaradás elvét alkalmazzuk. Ha a rendszer energetikailag stabil állapotban van, akkor a rendszerbe beáramló és az onnan távozó energia előjeles összege zérus [95, 106]. Culick [96] eredményeinek felhasználásával Matveev [95] meghatározta az  $n$ -ik akusztikus módusban a rendszerbe jutó energiát:

$$\Delta E_{ben} = \frac{(\kappa - 1) \cdot \pi \cdot P \cdot S \cdot p_{\max}^2}{2 \cdot v_h^3 \cdot \rho_0 \cdot \dot{m} \cdot \omega_n} \cdot A_n \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{x_r}{L}), \quad (7.37)$$

ahol  $P$  a rácsra jutó hőteljesítmény,  $\dot{m}$  a levegő tömegárama,  $p'_{\max}$  a hangnyomás maximuma,  $S$  a cső belső keresztmetszete,  $\kappa = c_p/c_v$  az adiabatikus gáz konstans,  $A_n$  az ún. átviteli függvény,  $\varphi_n$  a fáziskésés,  $\omega_n$  a körfrekvencia az  $n$ -ik akusztikus módusban,  $\rho_0$  a levegő átlagsűrűsége [95].

Az átviteli függvény egy adott időpillanatban nagyon komplex lehet; több dologtól is függ: a rács helyzetétől, az áramlás jellemzőitől, a rendszer korábbi fizikai paramétereitől [94, 95, 106, 107, 108]. Matveev elvégezte az átviteli függvény közelítőleges meghatározásához szükséges számításokat [95]. Mivel a méréseinkhez használt Rijke-cső méretei nagyjából hasonlóak voltak a Matveev által használt Rijke-cső méreteihez, és az elektromos fűtés is nagyjából hasonlóan történt, ezért az egyszerűség kedvéért Matveev [95] eredményeit használtuk fel.

A Rijke-csőben az energiaveszteség két részre bontható. Egyfelől a cső belsejében lévő határrétegen vész el energia ( $\Delta E_{hr}$ ), melynek értéke az  $n$ -ik akusztikus módusban [95, 109]:

$$\Delta E_{hrn} = \frac{\pi^2 R_{cső} \cdot L \cdot p_{\max}^2}{\sqrt{2} v_h^2 \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{\omega_n}} \left( \sqrt{\nu} + (\kappa - 1) \sqrt{\chi} \right) \quad (7.38)$$

ahol  $R_{cső}$  a Rijke-cső sugara,  $L$  a cső hossza,  $p'_{\max}$  a hangnyomás maximuma,  $\omega_n$  a körfrekvencia az  $n$ -ik akusztikus módusban,  $\rho_0$  a levegő átlagsűrűsége,  $v_h$  a hangsebesség,  $\kappa$  az adiabatikus gáz konstans,  $\nu$  a levegő kinematikai viszkozitása,  $\chi$  a levegő hővezetési együtthatója [95, 109].

Másfelől a cső végeinél fellépő hangsugárzás miatt is energiaveszteség ( $\Delta E_{hs}$ ) lép fel az  $n$ -ik akusztikus módusban [95, 109]:

$$\Delta E_{hsn} = \frac{\omega_n \cdot S^2 \cdot p_{\max}^2}{2 \cdot v_h^3 \cdot \rho_0}, \quad (7.39)$$

ahol  $S$  a Rijke-cső belső keresztmetszete.

Ha a rács által az áramló levegőnek átadott energia nagysága meghaladja a határrétegben disszipálódó energia és a kisugárzott energia összegének nagyságát, akkor a rendszer instabil állapotba kerül. A rendszer gerjesztéséhez szükséges kritikus teljesítmény ( $P_{kr}$ ) az a minimális teljesítmény, amit ha túllépünk, akkor már gerjeszthető az adott körülmények között a termoakusztikus rendszer [95]. A kritikus teljesítmény egy olyan határteljesítmény, amikor a rendszerbe bevitt energia éppen egyensúlyban van a veszteségek miatt kiáramló energiával.

Culick szerint a termoakusztikai rendszer akusztikus módusai jó közelítéssel függetlennek tekinthetők, ezért az akusztikus módusokat külön-külön vizsgálhatjuk [107]. Egyensúly esetén az  $n$ -ik akusztikus módusra felírhatjuk [95 és 107 alapján]:

$$\Delta E_{ben} = \Delta E_{hrn} + \Delta E_{hsn}. \quad (7.40)$$

Az előbbi egyenletek felhasználásával [95] alapján írhatjuk:

$$\begin{aligned} & \frac{(\kappa - 1) \cdot \pi \cdot P_{krn} \cdot S \cdot p_{\max}^2}{2 \cdot v_h^3 \cdot \rho_0 \cdot \dot{m} \cdot \omega_n} \cdot A_n \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \sin(n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{x_r}{L}) = \\ & = \frac{\pi^2 R_{cső} \cdot L \cdot p_{\max}^2}{\sqrt{2} v_h^2 \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{\omega_n}} \left( \sqrt{\nu} + (\kappa - 1) \sqrt{\chi} \right) + \frac{\omega_n \cdot S^2 \cdot p_{\max}^2}{2 \cdot v_h^3 \cdot \rho_0}. \end{aligned} \quad (7.41)$$

Az egyszerűsítések után, [95] alapján kapjuk a kritikus teljesítményt:

$$P_{krn} = \dot{m} \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot v_{h,T} \cdot R_{cső} \cdot L \cdot \sqrt{\omega_{n,T}} \cdot \left( \sqrt{\nu_T} + (\kappa - 1) \sqrt{\chi_T} \right) + \sqrt{2} \cdot \omega_{n,T}^2 \cdot S^2}{\sqrt{2} (\kappa - 1) \cdot \pi \cdot A_n \cdot S \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \sin(2 \cdot k_n \cdot x_r)}. \quad (7.42)$$

Az egyenletekben a  $T$  alsó index arra utal, hogy az adott mennyiség függ a hőmérséklettől. A hangsebesség, a kinematikai viszkozitás és a hővezetési együttható értékeit a kísérletek során mért átlaghőmérsékletnek megfelelően számoltuk, táblázatkezelő program segítségével.

A projektben a kritikus teljesítmény meghatározására koncentráltunk. A kapott egyenletet úgy is értelmezhetjük, hogy a rendszer gerjesztésének határesetében a bemenő kritikus teljesítmény éppen egyensúlyt tart az időegység alatt a határretegben disszipálódó energia és az időegység alatt kisugárzott hangenergia összegével:

$$P_{krn} = P_{hrn} + P_{hsn}, \quad (7.43)$$

ahol

$$P_{hrn} = \dot{m} \frac{\sqrt{2} \cdot v_{h,T} \cdot L \cdot \sqrt{\omega_{n,T}} \cdot (\sqrt{v_T} + (\kappa - 1)\sqrt{\chi_T})}{(\kappa - 1) \cdot A_n \cdot R_{cső} \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \sin(2 \cdot k_n \cdot x_r)}, \quad (7.44)$$

illetve

$$P_{hsn} = \dot{m} \frac{\omega_{n,T}^2 \cdot R_{cső}^2}{(\kappa - 1) \cdot A_n \cdot \sin(\varphi_n) \cdot \sin(2 \cdot k_n \cdot x_r)}, \quad (7.45)$$

ahol  $R_{cső}$  a Rijke-cső sugara.

## Eredmények

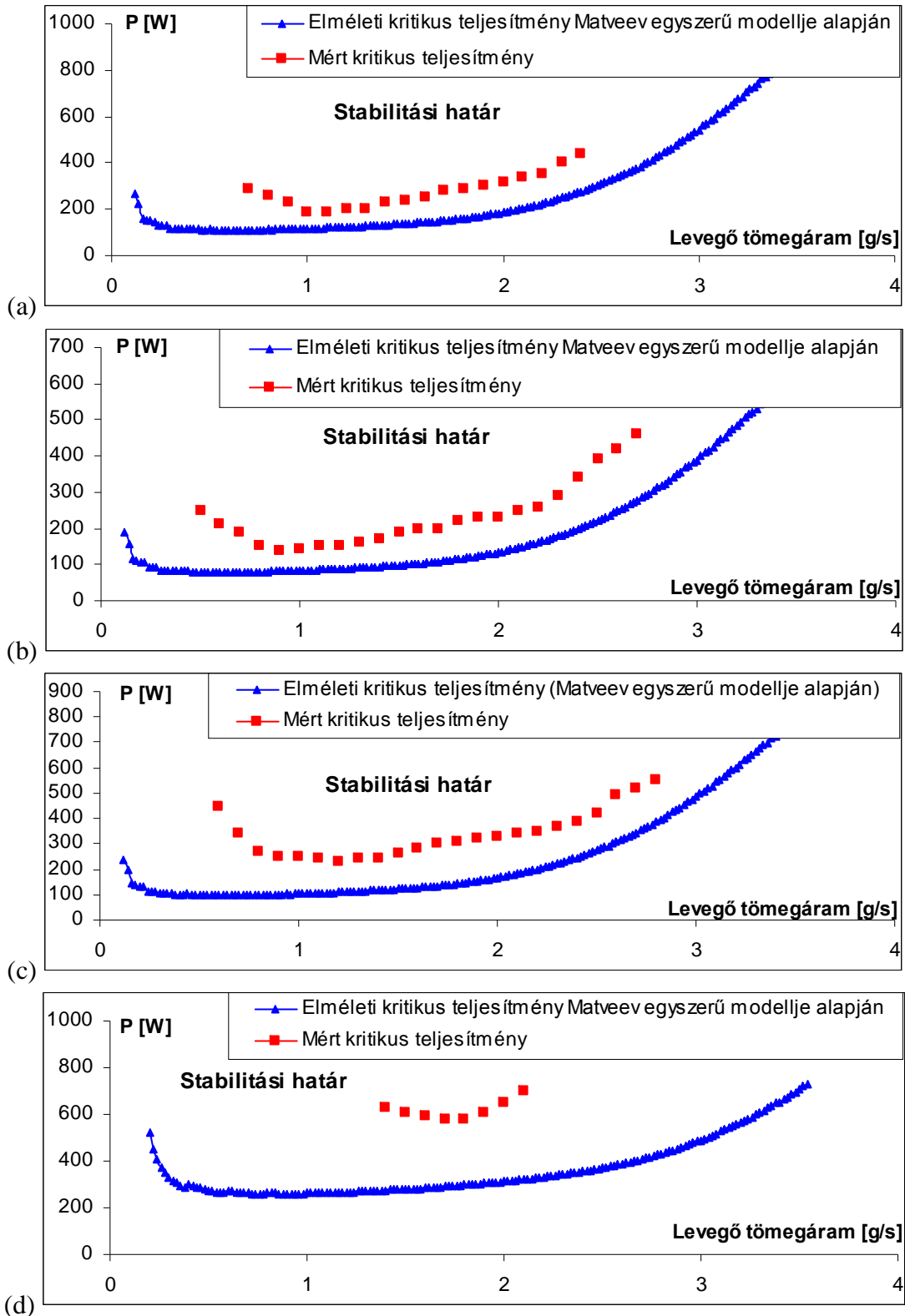
A kísérleti tapasztalatok alapján az alsó rácshelyzetek estén  $x_r=L/4$  rácspozíciónál, a felső rácshelyzetek estén  $x_r=5L/8$  rácspozíciónál gerjeszthető legkönnyebben a Rijke-cső [95].

Matveev [95] egyszerű modellje alapján azt kaptuk, hogy a Rijke-cső stabil és instabil állapotát elválasztó határvonalak minimumot mutató (parabolához némileg hasonló) görbék. Matveev [95] egyszerű modelljének eredményei és a mérések eredményei láthatók a 7.16. ábrán.

Mi csak az első és a második módust ellenőriztük az instabilitás szempontjából, mivel a magasabb módusok esetén a csillapítás nagyon gyorsan nő a frekvenciával [95, 105]. Elsőként kiválasztottuk a rácspozíciót, majd a levegő tömegáramát, és a modell alapján meghatároztuk azt a kritikus teljesítményt, ami már elegendő ahhoz, hogy a Rijke-cső instabil állapotba kerüljön. A kritikus teljesítmények meghatározása során a tanulókkal együttműködve összehasonlítottuk Matveev [95] egyszerű modelljéből kapott eredményeket a méréseink eredményeivel. A gerjesztéshez szükséges küszöbtejesítményeket különböző rácspozíciók esetén vizsgáltuk a leírt módszer segítségével.

Ha a rács az ideális  $x_r=L/4$  helyen van és a levegő tömegáram 0,9 g/s-t meghaladja, akkor a modell alapján kapott értékek jól egyeznek a kísérletileg mért értékekkel. Alacsonyabb levegő tömegáram (0,5 – 0,8 g/s) esetén az elméleti modell által adott értékek, és a mérési eredmények között nagyobb eltérés adódik. A modelltől kapott eredmények jól egyeznek a tapasztalati értékekkel 0,9 – 2,4 g/s levegő tömegáram tartományban.

Az  $x_r=5L/8$  rácspozíció esetén; közepes levegő tömegáram mellett a stabilitási határértékek hasonlóak az előző esetekhez, de ez a tartomány jóval szűkebb, kb. 1,4 – 2,2 g/s. Ebben a rácshelyzetben nagyobb hőteljesítmény szükséges ahhoz, hogy a rendszert instabil állapotba hozzuk, mint amikor a rács a cső alsó felében volt. Az  $x_r=5L/8$  rácspozícióban a második akusztikus módus gerjesztődik.



**7.16. ábra** A rendszer stabil és instabil állapotát elválasztó határvonal Matveev egyszerű modellje, illetve a mérések alapján: (a)  $x_r=L/8$ ; (b)  $x_r=L/4$ ; (c)  $x_r=L/3$ ; (d)  $x_r=5L/8$ .

A modell alapján kiszámított stabilitási görbéket a kísérletekből kapott eredményekkel összehasonlítva azt mondhatjuk, hogy a Matveev-féle egyszerű modell a rendszer paramétereinek középső tartományában jellegét tekintve megfelelően írja le a Rijke-cső viselkedését a gerjeszthetőség szempontjából [95]. (A relatív hiba kb. 20-50%.)

## 8. A projektmunka hatásainak vizsgálata

Ebben a fejezetben arra keresek választ, hogy a tanulók általában hogyan viszonyulnak (viszonyultak) a projektmunkához [B1, B24]. Az iskolánkban megvalósított projekteket 2 csoportba sorolhatjuk:

- kötelező projektfeladatok: ezekben minden érintett diáknak részt kellett vennie;
- szabadon választható projektfeladatok: ezekben bárki részt vehetett, akiket érdekelt a téma.

Az elmúlt tanévek során az iskolánkban megvalósítottunk több olyan fizikai témájú projektfeladatot, melyekben a fizikához más természettudományos tantárgyak is szerves módon hozzákapcsolódtak. Az informatikai ismeretekre minden projektben szükség volt. A szabadon választható fizikai témájú természettudományos projekteken (SZAVFIT projektek) önkéntes alapon vehettek részt az iskolánk gimnazista tanulói.

A feladatokat általában délutánonként hajtottuk végre fizika szakkör-foglalkozásokon. A projektek folyamán a kísérleteket, méréseket, számítógépes szimulációkat csoportmunkában végeztük. A csoportokat a diákok alakították ki szabadon. Alapvetően olcsó, minden iskolában megtalálható eszközöket használtunk; amelyek nem voltak meg a mi iskolánkban, azokat pedig kölcsönkértük. A SZAVFIT projekteken a tanulóknak nem csak a fizikai ismereteik bővültek, hanem a természettudományos gondolkodásuk, a problémalátó és problémamegoldó képességük is fejlődött. A természettudományos kompetenciák mellett a szociális jellegű (team-foglalkozás, feladatelosztás, eszközök megosztása, stb.) készségeik is fejlődtek.

### 8.1. SZAVFIT projektek eredményei és hatásai

A projektmunka során a tanulóknak gyarapszanak az ismereteik, fejlődnek a különböző képességeik, kompetenciáik. Arra voltam kíváncsi, hogy ez a fejlődés a tanulók szaktárgyi tudásában is megmutatkozik-e; azaz nem csak az adott projektfeladathoz kapcsolódó ismereteik bővülnek, hanem ez a tudás beépül-e a tanulók tudásbázisába. Érdekelt, hogy a diákok a projekteken kívül is fogják-e használni (tudják-e használni) a megszerzett ismereteiket [B1].

Megvizsgáltam, hogy a diákjaink tanulmányi munkájában, tanulási teljesítményében mennyire mérhető a fizikai témájú természettudományos projekteken való részvétel hatása. Mivel a SZAVFIT projektek hosszabb ideig tartottak, ezért arra gondoltam, hogy az évközben írt fizika témazáró dolgozatokkal fogom a teljesítményük változását mérni. Nyilvánvaló, hogy a projektmunka során nem csak a fizikai ismereteik bővültek, sőt a projekt témák (altémák) egy része nem is tartozott bele a kötelező középiskolás tananyagba, de azt feltételeztem, hogy azon tanulóknak, akik hosszabb távon részt vettek a projekteken, javulni fog a fizika tanórai teljesítménye is.

Természetesen nem a témazáró dolgozat az egyetlen mércéje a tanulók teljesítményének, de bizonyos szempontból megfelelő indikátornak tekinthetjük. A teljesítmények értékeléséhez tudnunk kell, hogy fizikából minden évfolyamon minden félévben 3 db témazáró dolgozatot szoktunk írni.



A fizikai témájú természettudományos projektekben – 2003 és 2015 között – az iskolánkban összességében 81 gimnazista tanuló vett részt rendszeresen. Ezen tanulónak vizsgáltam a témazáró dolgozatokban bekövetkező változását. Összehasonlítottam a diákoknak a projekt előtti tanévében, illetve a fizikai témájú természettudományos projektek tanévében a fizika témazáró dolgozatok százalékpontokban mérhető teljesítményét. (Ha valaki több tanéven keresztül is részt vett a SZAVFIT projektekben, akkor e tanulónál csak a projektmunka előtti évet és az első projektés évet hasonlítottam össze.)

Megállapítottam, hogy a SZAVFIT projektekben résztvevő diákok átlagteljesítménye 9,78%-kal javult (63,93%-ról 73,71%-ra), tehát a projektfeladatok tanévében általában jobb eredményeket értek el a tanulók a fizika témazáró dolgozatokban.

A témazárók eredményeinek szórásával is jellemezhetjük a teljesítményt. Minél kisebb a szórás, annál egyenletesebb a tanuló évközi teljesítménye. Azt állapítottam meg, hogy tanulók döntő többségénél csökkent, néhány tanulónál kis mértékben növekedett a fizika témazáró dolgozatok százalékpontjainak szórása. Ebből arra következtettem, hogy a projektmunka hatására a tanulók egyenletesebben teljesítettek a témazáró dolgozatokban. Összességében a projektben résztvevő diákok témazáró dolgozatainak átlagos szórása 1,72%-kal csökkent fizikából (7,86%-ról 6,14%-ra), ezért ebből a szempontból is sikeresnek értékelhetők a SZAVFIT projektek.

Megvizsgáltam azoknak a tanulónak is a fizika témazáró dolgozatokban elért teljesítmény változását, akik nem vettek részt a fizikai témájú természettudományos projektfeladatban. Ezek a tanulók osztálytársaik voltak az önkéntes alapon résztvevő diákoknak (természetesen különböző évfolyamokon), tehát egyfajta kontroll csoportként szolgáltak a vizsgálataimban. Összesen 321 ilyen tanuló eredményeit követtem nyomon. Az összteljesítményük tekintetében 0,85%-os átlagos javulást tapasztaltam (62,62%-ról 63,46%-ra). A kontroll csoportban a fizika témazáró dolgozatokban elért teljesítmények szórása 0,70%-kal csökkent, 9,34%-ról 8,64%-ra.

Röviden összegezve kijelenthetem, hogy a szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektfeladatok hatására, a fizika tantárgy estén szignifikánsan jobb teljesítményt nyújtottak a diákjaink, és a témazáró dolgozatok pontjainak szórása is szignifikáns módon csökkent  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett [110]. A kapott eredmények alátámasztják azt a korábbi feltevésemet, mely szerint egy adott tantárgy esetén a projektfeladatok alkalmasak a tanulók szaktárgyi teljesítményének javítására.

Ezt azért tartom lényegesnek, mert sok pedagógus azért nem valósít meg egyetlen projektet sem, mert attól fél, hogy csak elfecsérlik az időt, és nem gyarapodik közben a tanulók tudása. Véleményem szerint, a jól megtervezett és kivitelezett projektfeladatoknak pozitív hatása van a diákok tanulmányi teljesítményére is [B1].

A szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektfeladatokban résztvevő tanulók informatika tantárgyat is tanultak. A tanulóknak megvizsgáltam az informatika tantárgyban bekövetkező teljesítmény változását a témazáró dolgozatok százalékpontjai alapján. Feltételeztem, hogy a projektek hatására a tanulók informatikai tudása is gyarapszik, mivel mindegyik projektfeladatban szükség volt alkalmazott informatikai ismeretekre is (pl. táblázatkezelés, prezentációkészítés, weblap-szerkesztés, programozás). Az átlagteljesítmény 8,03%-kal növekedett a projektek tanévében (67,80%-ról 75,83%-ra), a szórások átlagértéke viszont 1,30%-kal csökkent (7,49%-ról 6,19%-ra) [B1].

A SZAVFIT projektek hatására a tanulók átlagban jobban teljesítettek a fizika és az informatika témazáró dolgozatokban. Természetesen nem törvényszerű, hogy ettől jobban kedvelik e tantárgyakat a diákok, de a magasabb teljesítmény általában jobb érdemjegyeket, jobb osztályzatokat jelent, és ez a siker sok tanulót motivál. (A projektek hatása megmutatkozik a tanulók tantárgyakhoz fűződő viszonyában, attitűdjében is; ezt is bemutatom.)

## 8.2. Az iskolai projektfeladatok kérdőíves vizsgálata

Kérdőíves vizsgálat sorozatban arra kerestem választ, hogy a projekteknek általánosságban milyen hatása volt a tanulókra, a projektfeladatokban való részvétel hogyan befolyásolta a diákok tanulással kapcsolatos attitűdjét [B24]. Elsősorban a természettudományos tantárgyakkal kapcsolatosan szerettem volna megtudni, vajon milyen hatást gyakoroltak a természettudományos jellegű projektek a diákok tantárgyakhoz fűződő beállítódására. Ezért az elmúlt tanévek végén megkértem a diákokat, hogy az adott tanévben az iskolánkban megvalósított projektekkel kapcsolatosan töltsenek ki egy kérdőívet.

A vizsgált időszakban – 2003 és 2015 között – tanévek végén a kérdőíveket összességében 402 tanuló töltötte ki. A válaszadó tanulókat két csoportra osztottam: összesen 81 diák vett részt rendszeresen az elmúlt tanévekben a szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektekből (SZAVFIT projektek); illetve összesen 321 olyan diák volt, akik nem vettek részt ilyen szabadon választható projektfeladatokban [B24].

**Az 1. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy általában szívesen vesz-e részt a projektmunkában a tanuló?**

Válaszként egy egész számot kellett beírni 0 és 5 között. A számok jelentése:

0	Utálom a projektmunkát.
1	Nem szeretem a projektmunkát.
2	Ha nehezen is, de kibírom.
3	Különösebben nem szeretem, de nem is utálom. Ez van, és kész.
4	Szeretem a projektmunkát általában, de azért néha egy kicsit fárasztó.
5	Szívesen vettem részt eddig az összes projektfeladatban.

A szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektekben résztvevő tanulók válaszainak átlaga 4,65 (a szórás 0,49). A SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók válaszainak átlaga 4,48 (a szórás 0,51). Az összes tanulót tekintve a válaszok átlaga 4,52 (a szórás 0,54).

A válaszokból kiderült, hogy egyértelműen kedvelik a tanulók a projekt-formájú munkavégzést, szívesen vesznek részt a különböző projektekben. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam, hogy a két csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között nem mutatható ki szignifikáns a különbség  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett [110].

**A 2. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy általában látja-e értelmét a projektmunkának a tanuló?**

Válaszként egy egész számot kellett beírni 0 és 5 között. A számok jelentése:

0	A projektmunka a legértelmetlenebb feladattípus.
1	Igazi értelmét nem láttam egyik projektnek sem.
2	Nem sok értelmét láttam az eddigi projekteknek, de talán egy kicsi értelmük mégis volt.
3	Valamennyi értelme volt a projekteknek, de azért nem mindig.
4	Szerintem volt értelme a projektmunkának, de azért lehetett volna néha egy kicsit jobb is.
5	Tetszett a projektmunka, mert láttam az értelmét a feladatoknak.

A szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektekben résztvevő tanulók válaszainak átlaga 4,57 (a szórás 0,51). A SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók válaszainak átlaga 4,27 (a szórás 0,55). Az összes tanulót tekintve a válaszok átlaga 4,33 (a szórás 0,54).

A válaszokból kiderült, hogy a diákok szerint a projektmunkának általában van értelme. Ebben a kérdésben nagyon hasonló átlagok jöttek ki összesítésben, mint az előző kérdés válaszainak átlaga; tehát a tanulók egyfelől érzelmileg is kedvelik a projektfeladatokat, másfelől hasznosnak is találják őket, általánosságban. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a két csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett [110].

**A projektmunka során néha egyedül, máskor párosan, esetleg csoportban kell tevékenykedni. A 3. kérdésben arra kerestem választ, hogy melyik fajta munkavégzést mennyire kedvelik a tanulók?**

Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni 0 és 5 között. A számok jelentése:

0	Teljes mértékben utálom.
1	Nem szeretem.
2	Elviselem valahogy.
3	Tűrhető.
4	Tetszik.
5	Nagyon szeretem.

A tanulók által megadott válaszok átlagai a 8.1. táblázatban találhatóak.

**8.1. táblázat** Mennyire kedvelik a tanulók az egyéni, a páros, illetve a csoportos munkavégzést.

Munkavégzés típusa	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás
Egyéni	SZAVFIT projektekben résztvevő tanulók	2,65	0,57
	SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók	1,86	0,90
	<b>Összes tanuló</b>	<b>2,02</b>	<b>0,90</b>
Páros	SZAVFIT projektekben résztvevő tanulók	4,04	0,37
	SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók	3,18	0,72
	<b>Összes tanuló</b>	<b>3,35</b>	<b>0,75</b>
Csoportos	SZAVFIT projektekben résztvevő tanulók	4,57	0,51
	SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók	4,18	0,69
	<b>Összes tanuló</b>	<b>4,25</b>	<b>0,68</b>

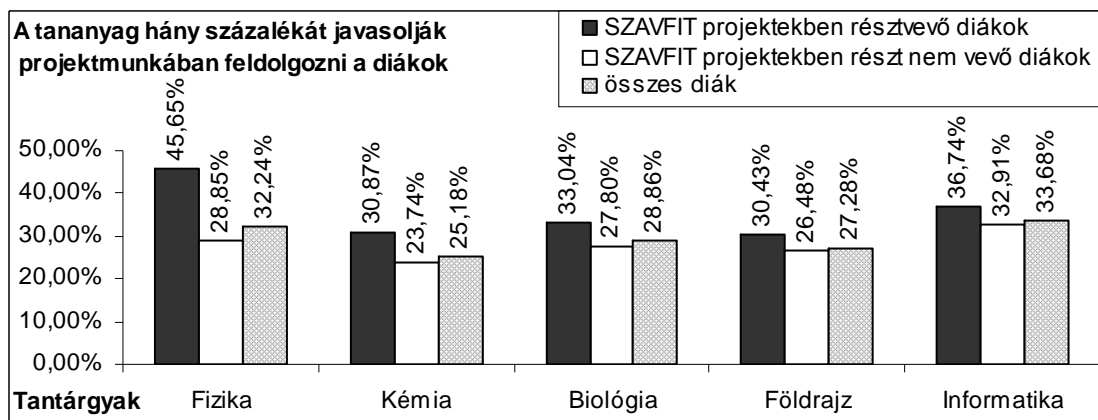
Láthatjuk, hogy a projektfeladatok során az egyéni munkavégzést inkább csak elviselik (eltűrik) a tanulók. Sokkal jobban kedvelik a diákok, ha a projekt folyamán valakivel párban oldhatnak meg valamilyen feladatot, és egyértelműen a csoportos munkavégzést szeretik leginkább a projektfeladatok során.

Ehhez természetesen az is szükséges, hogy a projektmunka során olyan csoportok jöjjenek létre, melyekben a tagok jól együtt tudnak dolgozni. Egy rosszul összeállított csoporton belül valószínűleg a tagok nem szívesen dolgoznak együtt, tehát itt nem is valósul meg valódi kooperatív munkavégzés. Egy pedagógus számára persze az is cél lehet, hogy megtanítsa a diákokat arra, hogy bárkivel együtt tudjanak dolgozni. A tapasztalataim alapján ez ritkán vezet eredményre. Sokkal jobb, ha a diákok egymás közt szabadon alakítják ki a projekt csoportokat, nem pedig külső (tanári) kényszer hatására.

A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a SZAVFIT projektfeladatokban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett, az egyéni, a páros, és a csoportos munkavégzés tekintetében is.

**A 4. kérdésben arra kerestem választ, hogy a tanulók szerint a tananyag hány százalékát lehetne (kellene) projektmunkával feldolgozni a megadott tantárgyakból?**

Válaszként egy-egy százaléktérket kellett beírni 0% és 100% között. A tanulók válaszaiból kiderült, hogy szerintük a természettudományos tantárgyaknak hozzávetőlegesen 30%-át érdemes lenne projektelvűen feldolgozni. A könnyebb összehasonlítás érdekében az adatokat grafikusán ábrázoltam a 8.1. ábrán.



**8.1. ábra** A tanulók szerint a természettudományos tantárgyak hány százalékát lenne érdemes projektszerűen tanulni.

Egyetlen tanuló sem jelölt meg 10%-nál kisebb értéket, tehát a felsorolt természettudományos tantárgyak tananyagának minimum egy tizedét szeretnék a diákok projektmódszerrel feldolgozni.

Megfigyelhetjük, hogy a SZAVFIT projektekben résztvevő tanulók átlagosan magasabb értékeket adtak meg, mint azok a diákok, akik nem vettek részt ezen projektfeladatokban; tehát a szabadon választható fizikai témájú természettudományos projektek hatására projekt-centrikusabbá, projekt-tudatosabbá váltak a résztvevő tanulók. Természetesen az is lehetséges, hogy azok a tanulók választották a SZAVFIT projekteket, akik már eleve jobban szerették a projekt típusú feladatokat. Valószínű, hogy ezek a tanulók a későbbi projektmunkához is pozitívabban állnak hozzá. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a két csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség fizika, kémia és biológia tantárgyakból  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett [110].

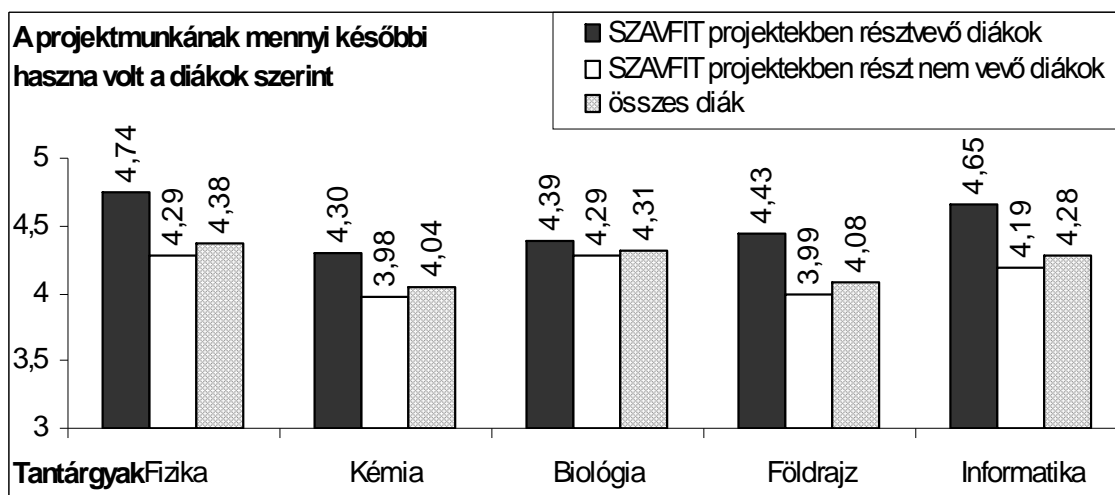
**Az 5. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy a természettudományos tantárgyak esetén a projektmunkának volt-e későbbi haszna, eredménye a tanulók szerint?**

Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni 0 és 5 között. A számok jelentése:

0	Semmi későbbi haszna sem volt a projekteknek ebből a tantárgyból.
1	Nagyon kevés későbbi hasznát láttam a projekteknek ebből a tantárgyból.
2	Kevés későbbi haszna volt a projekteknek ebből a tantárgyból.
3	Szerintem közepes mennyiségű haszna volt a projektmunkának ebből a tantárgyból.
4	Elég hasznosnak gondolom a projektfeladatokat ebből a tantárgyból.
5	Nagyon hasznosnak gondolom a projektmunkát ebből a tantárgyból.

A válaszok alapján megállapítottam, hogy a tanulók mindegyik természettudományos tantárgy esetén hasznosnak értékelték a projektmunkát általánosságban. A természettudományos tantárgyakra összesítve az átlagérték 4,22. Ez jól összeeseng a 2. kérdésre adott válaszok 4,33-as átlagával. (Tehát nagyjából ugyanolyan átlagértékek jöttek ki, amikor a projektmunka értelmére kérdeztem rá, illetve a projektmunka későbbi hasznára.)

Megállapíthatjuk, hogy a természettudományos tantárgyak esetén a tanulók egyértelműen úgy ítélik meg, hogy a munkájuk eredményeit, tapasztalatait a projektek után is hasznosíthatják. A diákok tehát olyan ismereteket sajátítanak el a projektek során, amit később is alkalmazhatnak. A könnyebb összehasonlítás érdekében az átlageredményeket oszlopdiagramon ábrázoltam a 8.2. ábrán.



8.2. ábra A tanulók szerint a tantárgyakból mennyi későbbi haszna volt a projekt munkának..

A legjobb átlagértékek fizika és informatika tantárgyak esetén adódtak. A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a SZAVFIT projektfeladatokban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség fizika, kémia, földrajz és informatika tantárgyakból  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett [110].

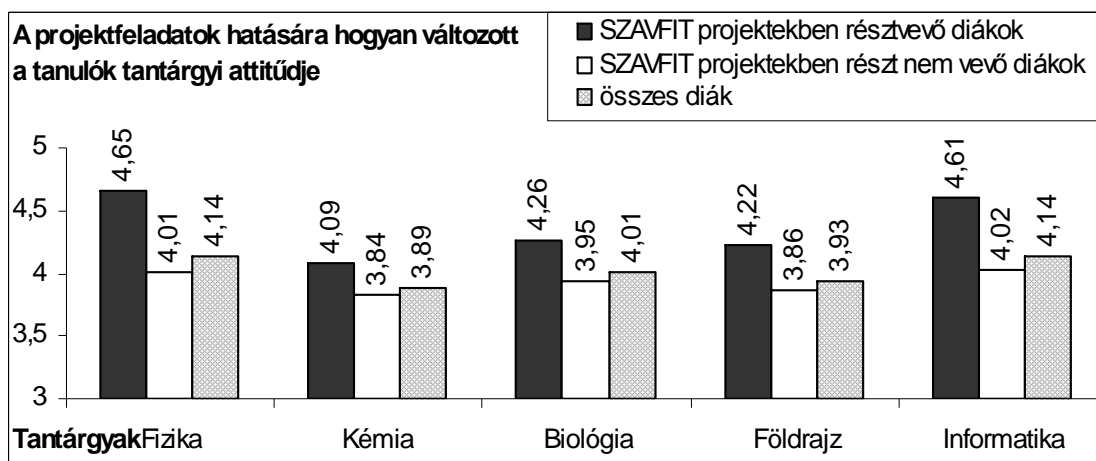
**A 6. kérdésben arra kerestem választ, hogy a megadott tantárgyak esetén a projektekben való részvétel hatására tanulóknak változott-e pozitív vagy negatív irányban az adott tantárgyhoz fűződő viszonyuk.**

Másként fogalmazva: a szaktárgyakhoz kapcsolódó tanulói attitűd változását vizsgáltam. Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni -5 és +5 között. Ebben a kérdésben a negatív értékek jelentik azt, ha a projekt munka következtében kevésbé szereti a tanuló az adott tantárgyat; és a pozitív értékek jelentik, ha a projektfeladatok következtében jobban kedveli a diák az adott tantárgyat.

A számok jelentése:

-5	A projekt munka miatt teljesen megutáltam ezt a tantárgyat.
...	...
0	A projektek miatt egyáltalán nem változott meg az adott tantárgyhoz való viszonyom.
...	...
+5	A projekt munka miatt sokkal jobban kedvelem ezt a tantárgyat.

A válaszok alapján megállapítottam, hogy a projektmunka hatására mindegyik természettudományos tantárgy esetén a korábbiakhoz képest jóval pozitívabban viszonyulnak a tanulók az adott szaktárgyhoz. A könnyebb összehasonlítás érdekében az átlageredményeket oszlopdiagramon ábrázoltam (8.3. ábra).



**8.3. ábra** Hogyan változott a tanulók tantárgyi attitűdje a projektfeladatok hatására.

A tanulók válaszaiból kiderült, hogy a projektfeladatok hatására minden természettudományos tantárgy esetén javult az adott tantárgy érzelmi megítélése, azaz javult a tantárgyi attitűd. A tanulók csak pozitív értékeket jelöltek meg; azaz a válaszadók között nincs olyan diák, aki a projektmunka hatására kevésbé szeretné az adott tantárgyat, mint azt a projekteket megelőzően tette. A legalacsonyabb átlagérték is 4 körül van, ami egyértelműen jónak mondható.

A legmagasabb átlagértékek fizika és informatika tantárgyakból jöttek ki, ami azt jelzi, hogy e tantárgyakhoz sokkal pozitívabban állnak hozzá a tanulók a projektmunkát követően. A fizikát tanító pedagógusok valószínűleg megtapasztalták, hogy milyen nehéz a tanulók egy jelentős hányadát motiválni a szaktárgy tanulására.

Maga a fizika tananyag nem lett sokkal könnyebb a projektek hatására, de a tanulók beállítódását mégis sikerült pozitív irányba elmozdítani. A tapasztalataim szerint a motiváltabb tanulók a későbbiek folyamán (egy darabig) hatékonyabban dolgoznak a normál tanórákon is. Ez meggyőzheti a kételkedő pedagógusokat arról, hogy érdemes a leggyakrabban alkalmazott frontális osztálymunka mellett (esetleg helyett) csoportos projektmunkát (is) szervezni.

A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két minta alapján, hogy a SZAVFIT projektfeladatokban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikánsnak mondható a különbség fizika, biológia, földrajz és informatika tantárgyakból  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett.

**A projektfeladatok közül volt olyan, ami csak egyetlen tantárgyat érintett, de voltak olyan projektek is, amelyekben több tantárgy összekapcsolódott. A 7. kérdésben arra voltam kíváncsi, hogy melyik típus mennyire tetszett?**

Válaszként egy-egy egész számot kellett beírni 0 és 5 között. A számok jelentése:

0	Nagyon rossz volt a projektmunka, utáltam az egészet.
1	Nem tetszett a projektmunka.
2	Különösebben nem tetszett a projektmunka, de azért elviselhető volt.
3	Volt olyan projektmunka, ami tetszett, de több dolgot is megváltoztatnék vele kapcsolatban.
4	Többségében tetszett a projektmunka, de volt egy-két dolog, amin változtatnék.
5	Nagyon tetszett az egész projektmunka.

A tanulói válaszok átlagait láthatjuk a 8.2. táblázatban.

**8.2. táblázat** Mennyire tetszettek a tanulóknak az egy tantárgyat érintő projektfeladatok, illetve mennyire tetszettek a több tantárgyat összekapcsoló projektek (átlagértékek).

Projekt típusa	Vizsgált tanulók	Átlagérték	Szórás
Egy tantárgyat érintő projekt	SZAVFIT projektekben résztvevő tanulók	3,83	0,39
	SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók	3,46	0,56
	<b>Összes tanuló</b>	<b>3,54</b>	<b>0,55</b>
Több tantárgyat összekapcsoló, integrált projekt	SZAVFIT projektekben résztvevő tanulók	4,70	0,47
	SZAVFIT projektekben részt nem vevő tanulók	4,52	0,52
	<b>Összes tanuló</b>	<b>4,55</b>	<b>0,52</b>

A válaszokból kiderült, hogy a tanulók az egy tantárgyat érintő projektfeladatokat elfogadják. A több tantárgyat érintő projektfeladatokra adott – az előbbtől 1,01 értékkel magasabb – átlag azt jelzi, hogy a több tantárgyat érintő projektmunkában szívesebben vesznek részt a tanulók. A 4,55-es átlagérték alapján azt mondhatjuk, hogy a diákok többsége szeret integrált, több tantárgyat összekapcsoló projektekben tevékenykedni.

A több tantárgyat is érintő projektmunka során az egyes tanulók sokféle tevékenységi formában vesznek részt és ez a változatos munkavégzés pozitívan befolyásolja a diákok hozzáállását is. A SZAVFIT projektekben a tanulók örömmel tapasztalták, hogy a fizikai, matematikai, informatikai, stb. ismereteiket együttesen is felhasználhatják; az interdiszciplináris tudásukat hatékonyabban kamatoztathatják a problémák megoldásában.



A statisztikai t-próba alapján megállapítottam a két mintából, hogy a SZAVFIT projektfeladatokban résztvevő tanulók és a kontroll csoporthoz tartozó tanulók által megadott értékek között szignifikáns a különbség az egy tantárgyat érintő projektfeladatokra adott válaszok alapján  $\alpha=0,05$  szignifikancia szint mellett; a több tárgyat érintő projektfeladatok tekintetében viszont nem mutatható ki szignifikáns eltérés [110].

**Az utolsó kérdésben a tanulók leírhatták a projektmunkával kapcsolatos személyes véleményeiket, ötleteiket, gondolataikat, javaslataikat.**

A válaszokból kiderült, hogy a tanulók általában szívesen vettek részt a különböző természettudományos projektekben, és a projektfeladatok során úgy érezték, hogy van értelme és haszna a munkájuknak. A pedagógusok számára ez fontos érv lehet, hogy miért érdemes természettudományos projekteket tervezni és megvalósítani.

A természettudományos projektfeladatok során a diákok megtanultak csoportokban dolgozni, fejlődött a kommunikációs képességük és összességében pozitívabban viszonyultak a természettudományokhoz [B24]. Úgy vélem, hogy a természettudományos tantárgyak oktatásában a projektmódszer az általános és a középiskolás korú tanulóknál is sikeresen alkalmazható; segít abban, hogy a diákoknak a természettudományos tantárgyakhoz kapcsolódó attitűdjét pozitív irányban befolyásolja.

## Függelék

A függőleges Rijke-csőben felfelé áramló levegő jellemzőit számítjuk ki egy középiskolai szinten is értelmezhető egydimenziós modell segítségével. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy az áramlás örvénymentes és stacionárius.

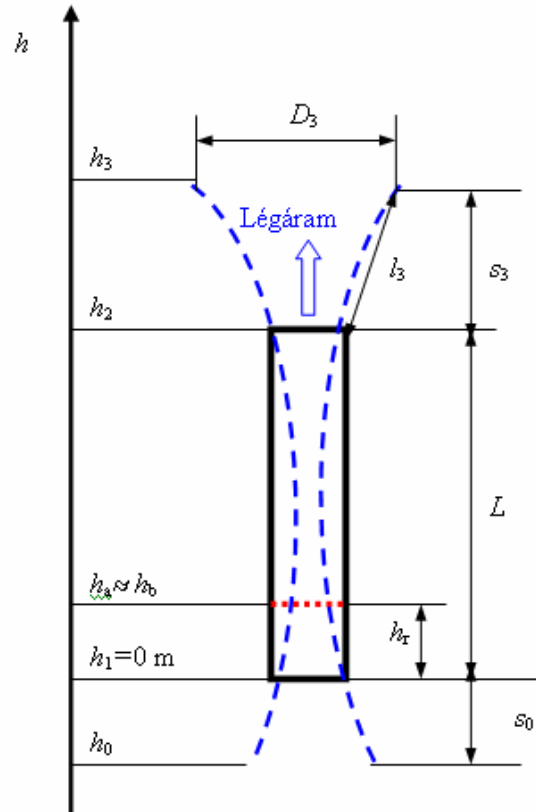
A Rijke-cső modellje: egy  $D$  átmérőjű,  $L$  hosszúságú függőleges cső, melyben egy fémrács van elhelyezve, az aljától  $h_r$  magasságban. A rácsot elektromos egyenárammal fűtjük, és feltételezzük, hogy a rács a hőt egyenletesen tudja leadni a teljes felületén.

### Stacionárius alapáramlás

A függőleges Rijke-csőben a levegő függőlegesen felfelé áramlik. Nevezzük  $s_0$ -nek a cső nyílása alatt azt a távolságot, ahol a levegő beáramlásának függőleges összetevője szinte teljesen eltűnik, hasonlóképpen nevezzük  $s_3$ -nak azt a távolságot, ahol a cső teteje felett a levegő kiáramlásának függőleges összetevője szinte eltűnik. E helyeken a levegő sűrűsége legyen  $\rho_{10}$ , a hőmérséklete  $T_{10}$  (alul), illetve  $\rho_{30}$  és  $T_{30}$  (felül).

Az egyszerűség kedvéért feltételezhetjük, hogy a  $T_0$  hőmérsékletű teremben a légkör izoterm, azaz  $T_{10}=T_{30}=T_0$ . A cső aljánál (ahol az áramvonalak széttartása figyelmen kívül hagyható) a levegő hőmérséklete legyen  $T_1$ , a sűrűsége  $\rho_1$ , az áramlás sebessége  $v_1$ ; cső tetejénél (ahol az áramvonalak széttartása figyelmen kívül hagyható) a levegő hőmérséklete legyen  $T_2$ , a sűrűsége  $\rho_2$ , az áramlás sebessége  $v_2$ .

A Rijke-csőben közvetlenül a fűtött rács alatt a levegő hőmérséklete legyen  $T_a$ , a sűrűsége  $\rho_a$ , az áramlás sebessége  $v_a$ ; közvetlenül a fűtött rács felett a levegő hőmérséklete legyen  $T_b$ , a sűrűsége  $\rho_b$ , az áramlás sebessége  $v_b$ . Az F.1. ábra a függőleges helyzetű Rijke-csővet ábrázolja sematikusán.



**F.1. ábra** Függőleges Rijke-cső modellje.

### Feltevések és összefüggések

A levegő nyomása ( $p$ ), térfogata ( $V$ ) és abszolút hőmérséklete ( $T$ ) közötti kapcsolatot az ideális gáz állapotegyenletéből kapjuk [76]:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T, \quad (\text{F.1})$$

ahol  $m$  a gáz tömege,  $M$  a gáz moláris tömege (levegőre  $M=0,02896$  kg/mol), az egyetemes gázállandó  $R=8,314$  J·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>. Kifejezhetjük a gáz sűrűségét:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}. \quad (\text{F.2})$$

Az áramlás során csak a ráctól átvett hővel számolunk, a gáz állapotváltozását egyébként adiabatikusnak tekintjük [76]:

$$\frac{T}{\rho^{\kappa-1}} = \text{állandó}, \quad (\text{F.3})$$

ahol  $\kappa$  az adiabatikus konstans, amit az állandó nyomáson és az állandó térfogaton mért fajhők hányadosaként kapunk, azaz  $\kappa=c_p/c_v$  (levegőre  $\kappa \approx 1,4$ ).

Az áramlás során a viszkozitás szerepét nem lehet teljesen elhanyagolni. Úgy vesszük, hogy a cső falánál kialakul egy határréteg (Prandtl elmélete), itt figyelembe vesszük a viszkozitást, a cső középső részén viszont elhanyagoljuk a viszkozitás szerepét. A levegő belső súrlódási együtthatója (dinamikai viszkozitása)  $\eta \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . A viszkozitási együttható függ a hőmérséklettől, de ezt most elhanyagoljuk. Az egyszerűség kedvéért a Newton-féle súrlódási törvény alapján számoltunk a viszkozitással [76]:

$$F_{\text{visz}} = \eta \cdot A_f \cdot \frac{dv_r}{dr}, \quad (\text{F.4})$$

ahol  $A_f$  a határréteg felülete,  $dv_r/dr$  a radiális sebességesezés.

A határréteg vastagságát ( $\delta$ ) síkfelület esetén kiszámíthatjuk. A Rijke-csőben kialakuló határréteg pontos kiszámítása ettől bonyolultabb, de nagyságrendi becslésre ezt a képletet használtuk [76]:

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\eta \cdot l}{\rho \cdot v}}, \quad (\text{F.5})$$

ahol  $l$  a határréteg hossza. A határréteg vastagsága a számítások szerint mm-es nagyságrendbe esik, tehát a határréteg vastagsága bizonyos szempontból tényleg kevésbé számít. (Valóságban a határréteg vastagsága a cső mentén növekszik, nem állandó.)

Az egyszerűség kedvéért úgy vesszük, hogy a cső belsejében a levegő  $v$  sebességgel áramlik, a cső falánál az áramlás sebessége zérus, a határrétegben az áramlási sebesség egyenletesen csökken le. Az egyszerűsített modellünkben a  $D$  átmérőjű és  $l$  hosszúságú csőben  $v$  sebességgel áramló levegőre felírtuk a Newton-féle súrlódási törvényt:

$$F_{\text{visz}} \approx \eta \pi (D - \delta) \frac{v}{\delta} \approx \eta \pi D l \frac{v}{\delta} \approx \eta \pi D l \frac{v}{\sqrt{\frac{\eta \cdot l}{\rho \cdot v}}} \approx \eta \pi D l v \sqrt{\frac{\rho \cdot v}{\eta \cdot l}} \approx \pi D \sqrt{\eta \cdot \rho \cdot l} \cdot v^{\frac{3}{2}} \quad (\text{F.6})$$

A cső rács alatti szakaszára alkalmazzuk az energiamegmaradás törvényét [76]:

$$g(h_1 - h_a) + p_1 \frac{V_1}{m} - p_a \frac{V_a}{m} + \frac{1}{m} \pi D \sqrt{\eta \cdot \rho \cdot l} \cdot v^{\frac{3}{2}} (h_1 - h_a) \approx \frac{1}{2} v_a^2 - \frac{1}{2} v_1^2 + c_v T_a - c_v T_1. \quad (\text{F.7})$$

ahol  $c_v = 712 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  az állandó térfogathoz tartozó fajhő,  $c_p = 997 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a levegő állandó nyomáson mért fajhője,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  a nehézségi gyorsulás értéke.

A Robert Mayer egyenlet szerint [76]:

$$c_p - c_v = \frac{R}{M}. \quad (\text{F.8})$$

Az előbbi egyenletek alapján írhatjuk:

$$g(h_1 - h_a) + c_p (T_1 - T_a) + \frac{1}{2} (v_1^2 - v_a^2) - \frac{4}{D} \frac{1}{\rho V} \pi \frac{D^2}{4} (h_a - h_1) \sqrt{\eta \cdot \rho \cdot l} \cdot v^{\frac{3}{2}} \approx 0. \quad (\text{F.9})$$

Feltételezhetjük, hogy a cső aljánál, illetve a rács alatt az áramló levegő sebessége nem tér el jelentősen egymástól (azaz  $v_1 \approx v_a$ ), ezért írhatjuk:

$$g(h_1 - h_a) + c_p(T_1 - T_a) + \frac{1}{2}(v_1^2 - v_a^2) - \frac{4}{D} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} (h_a - h_1) \cdot \left(\frac{v_1 + v_a}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \approx 0. \quad (\text{F.10})$$

Ez az egyenlet a Bernoulli-egyenlethez [76] hasonló, abban különbözik tőle, hogy tartalmaz egy olyan (közelítő) tagot, ami a határréteg miatti súrlódásból származik.

Hasonló levezetés után a Rijke-csőben a rács felett áramló levegőre írhatjuk:

$$g(h_b - h_2) + c_p(T_b - T_2) + \frac{1}{2}(v_b^2 - v_2^2) - \frac{4}{D} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} (h_2 - h_b) \cdot \left(\frac{v_b + v_2}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \approx 0. \quad (\text{F.11})$$

Feltételezhetjük, hogy a rács valamilyen mértékben akadályozza a levegő áramlását. Ez a hatás a levegő viszkozitásával arányos. Mivel a cső középső részén a levegő áramlásában a viszkozitást elhanyagoltuk, ezért a középső részen a rács akadályozó hatását is elhanyagolhatjuk az egyszerűség kedvéért. A szélső peremgyűrűben (a határrétegnél) figyelembe kell venni a viszkozitást, ezért itt a rács akadályozó hatásával is számolnunk kellene; de a határréteg vékonysága miatt az egyszerűség kedvéért most ezt is elhanyagoljuk.

### Áramlás a cső belsejében

Vizsgáljuk meg a cső belsejében áramló levegőt! Elsőként felírjuk a tömegmegmaradást kifejező kontinuitási egyenletet a cső alsó részére [76]:

$$\rho_1 \cdot v_1 = \rho_a \cdot v_a. \quad (\text{F.12})$$

A csőben a rács alatt áramló levegő állapotváltozását adiabatikusnak tekinthetjük, ezért írhatjuk [76]:

$$\frac{T_a}{T_1} = \frac{\rho_a^{\kappa-1}}{\rho_1^{\kappa-1}}. \quad (\text{F.13})$$

Nevezzük el a  $T_a/T_1$  hőmérsékletek arányát  $\xi$ -nek:

$$\xi = \frac{T_a}{T_1} = \left(\frac{\rho_a}{\rho_1}\right)^{\kappa-1}. \quad (\text{F.14})$$

Ez alapján írhatjuk:

$$T_a = \xi \cdot T_1, \quad (\text{F.15})$$

illetve

$$v_a = \frac{\rho_1}{\rho_a} \cdot v_1 = \xi^{\frac{-1}{\kappa-1}} \cdot v_1. \quad (\text{F.16})$$

Visszahelyettesítünk a (F.10) egyenletbe, így kapjuk  $h_1=0$  felhasználásával:

$$g(-h_a) + c_p T_1 (1 - \xi) + \frac{1}{2} v_1^2 \left(1 - \xi^{\frac{-2}{\kappa-1}}\right) - \frac{4}{D} \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} h_a \cdot \left(\frac{v_1}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \left(1 + \xi^{\frac{-1}{\kappa-1}}\right)^{\frac{3}{2}} = 0. \quad (\text{F.17})$$

Előzetesen azt várhatjuk, hogy a  $\xi$  értéke közelítőleg 1 lesz. Az értékét táblázatkezelő programmal számítottuk ki becslést, de reális értékeknél. Ez alapján valóban  $\xi \approx 1$  értéket kaptuk.

Az egyes tagok nagyságrendjének becsléséből is kiderül, hogy az első, a harmadik és a negyedik tag elhanyagolható a másodikhoz képest, és hogy  $\xi \approx 1$ . Ez azt jelenti, hogy a hőmérsékletek, a sűrűségek és a sebességek a cső alsó nyílásánál, illetve a rács alatt közelítőleg megegyeznek:

$$v_1 \approx v_a, \text{ és } T_1 \approx T_a, \text{ és } \rho_1 \approx \rho_a. \quad (\text{F.18})$$

Ugyanígy lehet belátni, hogy a cső felső részében nagyjából hasonló a helyzet: a hőmérsékletek, a sűrűségek és a sebességek a rács felett, illetve a cső felső nyílásánál közelítőleg megegyeznek:

$$v_b \approx v_2, \text{ és } T_b \approx T_2, \text{ és } \rho_b \approx \rho_2. \quad (\text{F.19})$$

### Sebesség-, sűrűség- és hőmérséklet-ugrás a rácsnál

Ha a rács fékező hatását elhanyagoljuk, akkor a nyomások a rács alatt és felett közelítőleg megegyeznek:

$$p_a \approx p_b. \quad (\text{F.20})$$

A rácson átáramló levegő tömegmegmaradása miatt írhatjuk:

$$\rho_a \cdot v_a \approx \rho_b \cdot v_b. \quad (\text{F.21})$$

Az egyszerűség kedvéért feltételezhetjük, hogy a rácsot fűtő  $P$  teljesítmény a rácson átáramló levegőt melegíti; a hőközlés állandó nyomáson történik:

$$P \approx c_p \cdot A \cdot \rho_b \cdot v_b \cdot T_b - c_p \cdot A \cdot \rho_a \cdot v_a \cdot T_a. \quad (\text{F.22})$$

Kifejezhetjük a levegő hőmérsékletének megváltozását, miközben átáramlik a fűtött rácson:

$$T_b - T_a \approx \frac{P}{c_p \cdot A \cdot \rho_a \cdot v_a} \approx \frac{P}{c_p \cdot A \cdot \rho_b \cdot v_b}. \quad (\text{F.23})$$

Az (F.2) és az (F.20) egyenletekből adódik, hogy

$$\rho_a \cdot T_a \approx \rho_b \cdot T_b. \quad (\text{F.24})$$

Az (F.22) és az (F.24) egyenletekből kifejezhetjük a sebesség megváltozását a rácson való áthaladásakor:

$$v_b - v_a \approx \frac{P}{c_p \cdot A \cdot \rho_a \cdot T_a} \approx \frac{P}{c_p \cdot A \cdot \rho_b \cdot T_b}. \quad (\text{F.25})$$

Az előbbi egyenletekből kifejezhetjük a sűrűségek arányát:

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} \approx \left( 1 + \frac{P}{c_p \cdot A \cdot \rho_a \cdot v_a \cdot T_a} \right)^{-1}. \quad (\text{F.26})$$

Láthatjuk, hogy a fűtött rácson való átáramlásakor a levegő hőmérséklete és sebessége növekszik, a sűrűsége viszont csökken. Vezessük be a  $\chi$  dimenziótlan arányszámot a levegő rácson való áthaladásakor a hőmérsékletek arányára:

$$\chi = \frac{T_b}{T_a}. \quad (\text{F.27})$$

Az (F.23) és az (F.27) egyenletekből kapjuk, hogy

$$\chi \approx \frac{T_a + \frac{P}{c_p A \rho_a v_a}}{T_a} \approx 1 + \frac{P}{c_p A \rho_a v_a T_a}. \quad (\text{F.28})$$

Mivel  $T_b \approx T_2$ , és  $T_a \approx T_1 \approx T_0$ , ezért az (F.27) és az (F.28) egyenletek alapján írhatjuk

$$\chi \approx \frac{T_2}{T_0}, \quad (\text{F.29})$$

valamint

$$\chi \approx 1 + \frac{P}{c_p A \rho_a v_a T_0}. \quad (\text{F.30})$$

Fejezzük ki  $v_a$  értékét az (F.29) és az (F.30) egyenletekből!

$$v_a \approx \frac{P}{c_p A \rho_a} \cdot \frac{1}{T_2 - T_0} \approx \frac{P}{c_p A \rho_a T_0} \cdot \frac{1}{\chi - 1}. \quad (\text{F.31})$$

Az (F.21), az (F.25) és az (F.31) egyenletekből adódik, hogy a rácson való áthaladásnál a sebességek aránya megegyezik a hőmérsékletek arányával:

$$\chi \approx \frac{v_b}{v_a}. \quad (\text{F.32})$$

Az (F.31) és az (F.32) egyenletekből kapjuk, hogy

$$v_b \approx \chi \cdot v_a \approx \frac{P}{c_p A \rho_a T_0} \cdot \frac{\chi}{\chi - 1}. \quad (\text{F.33})$$

Mivel  $v_2 \approx v_b$ , ezért írhatjuk

$$v_2 \approx \frac{P}{c_p A \rho_a T_0} \cdot \frac{\chi}{\chi - 1}. \quad (\text{F.34})$$

Az (F.26) és az (F.31) egyenletek szerint

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} \approx \left( 1 + \frac{P}{c_p A \rho_a v_a T_a} \right)^{-1} \approx \frac{1}{\chi}. \quad (\text{F.35})$$

A rács által az áramló levegőnek átadott hőteljesítményt kifejezhetjük a rács felületegységre vonatkoztatott hőátadási tényezője ( $K$ ) és a hőmérsékletek segítségével:

$$P = K \cdot A \cdot (T_r - T_a) + K \cdot A \cdot (T_r - T_b), \quad (\text{F.36})$$

ahol  $T_r$  a rács hőmérséklete. Ha ismert  $K$  értéke, akkor ebből meghatározhatjuk a rács hőmérsékletét. Ha  $K$  nem ismert, akkor a hőmérsékletek és a teljesítmény mérésével meghatározhatjuk  $K$  értékét.

A Rijke-csőbe alulról beáramló levegő esetén a viszkozitást elhanyagolhatjuk az egyszerűség kedvéért, mivel itt egy viszonylag rövid szakaszon áramlik szabadon a levegő. Írjuk fel a Bernoulli-egyenletet a cső alatt áramló levegőre [76]:

$$\frac{v_{10}^2}{2} + c_p \cdot T_{10} + g \cdot h_0 = \frac{v_1^2}{2} + c_p \cdot T_1 + g \cdot h_1. \quad (\text{F.37})$$

A modellünkben  $h_0 = -s_0$ , és  $h_1 = 0$ , ezért írhatjuk

$$\frac{v_{10}^2}{2} + c_p \cdot T_{10} - g \cdot s_0 = \frac{v_1^2}{2} + c_p \cdot T_1, \quad (\text{F.38})$$

ahol  $v_{10}$  a feltevés szerint zérus, és  $T_{10} \approx T_0$ . Az egyenletet egyszerűbb alakra hozhatjuk:

$$c_p \cdot T_0 - g \cdot s_0 \approx c_p \cdot T_1 + \frac{v_1^2}{2}. \quad (\text{F.39})$$

Az egyes tagok nagyságrendjének becsléséből azt kapjuk, hogy elég a fajhőt és a hőmérsékletet tartalmazó tagokat figyelembe venni, azaz

$$c_p \cdot T_0 \approx c_p \cdot T_1. \quad (\text{F.40})$$

A Rijke-csőbe beáramló levegő hőmérséklete tehát közelítőleg megegyezik a terem levegőjének hőmérsékletével, azaz

$$T_1 \approx T_0. \quad (\text{F.41})$$

A Rijke-csőből felül kiáramló levegő esetén más a helyzet, de ezt csak vázlatosan tekintjük át. A fűtött rácsnál az áramló levegő felmelegszik, a csőből forró levegő lép ki a tetején. Ennek a kiáramló forró levegőnek a sűrűsége kisebb, mint a környező szobahőmérsékletű levegő sűrűsége, ezért felhajtóerő hat rá. A kiáramló levegő tehát felfelé áramlik tovább, addig, amíg nagyjából le nem hűl a terem hőmérsékletére. A felfelé áramlás során a levegő oldalirányban is tágul. Nem használhatjuk az (F.11) egyenlet eredményét, mert az egy egyenes csőben áramló levegőre vonatkozik. A csőből kiáramló levegő tágulása adiabatikusan megy végbe, miközben a nyomása a környező levegő nyomásával egyezik meg. A levegő nyomása  $z$  magasságban kifejezhető a barometrikus magasságformulával az izotermikus környezetben [76]:

$$p_3 = p(z) = p_2 \cdot \exp\left(-\frac{M \cdot g \cdot z}{R \cdot T_0}\right). \quad (\text{F.42})$$

A kiáramló levegő emelkedésének magasságát ( $s_3$ ) kifejezhetjük [76]:

$$s_3 \approx -\frac{R \cdot T_0}{M \cdot g} \ln\left(\frac{p(z)}{p_2}\right) \approx -\frac{R \cdot T_0}{M \cdot g} \ln\left(\frac{T(z)}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \approx \frac{R \cdot T_0}{M \cdot g} \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) = \frac{c_p \cdot T_0}{g} \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right), \quad (\text{F.43})$$

mivel az egyszerűség kedvéért feltételezhetjük, hogy  $z$  magasságban az áramló levegő visszahűl a környezet hőmérsékletére, azaz  $T(z) = T_3 = T_0$ .

Röviden összefoglalva: egy viszonylag egyszerű, középiskolai szinten megérthető modellel jellemeztük a függőleges Rijke-csőben áramló levegő stacionárius (alap) mozgását. Az egyszerűsített modellünk szerint azt kaptuk, hogy az elektromosan fűtött Rijke-csőben felfelé kezd áramlani a levegő; a cső alsó felében a levegő jellemzőit nagyjából állandónak tekinthetjük, a cső felső részében levegő jellemzőit közelítőleg szintén állandónak tekinthetjük; a rács környezetében viszont ugrásszerű változások történnek a levegő hőmérsékletében és sűrűségében, illetve az áramlás sebességében. Az áramló levegő hőmérséklete és a sebessége hirtelen megnő, a sűrűsége lecsökken a rácson való áthaladáskor.

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet és hálámat kifejezni a témavezetőmnek, Dr. Bene Gyulának, hogy támogatott a munkámban. Mindig voltak segítő javaslatai; rengeteg tanácsot és útmutatást adott az évek folyamán. Köszönöm a türelmét és azt, hogy megosztotta velem szakmai tudását, tapasztalatait. Külön köszönöm a dolgozat elkészítéséhez nyújtott segítségét.

Köszönetet mondok Dr. Tél Tamás professzor úrnak a hasznos útmutatásokért és a biztatásért.

Köszönetem fejezem ki Dr. Juhász András egyetemi docens úrnak a fizikatanítás módszertani lehetőségeinek sokszínű és érdekes bemutatásáért és a hasznos tanácsaiért.

Megköszönöm az ELTE Fizika Tanítása Doktori Program összes Tanárának, hogy tanítottak és megosztották velem a tapasztalataikat.

Köszönetet mondok Dr. Papp Katalin tanárnőnek (SZTE, Kísérleti Fizikai Tanszék), aki korábbi tanulmányaim során megismertette velem fizika tanítás módszertanát.

Köszönöm a feleségemnek, a családomnak és a barátaimnak, hogy bátorítottak és támogattak.

Köszönetem fejezem ki az iskolánk vezetőségének, hogy lehetővé tették a projektek magvalósítását.

Köszönöm a kollégáimnak a segítségüket. A kollégáim közül külön köszönetet mondok Pap Orsolyának és Fekete Antalnak a projektekben nyújtott segítségükért.

Köszönöm az iskolai projektfeladatokban résztvevő összes tanulónak a munkáját. Külön köszönöm a szabadon választható fizikai témájú természettudományos (SZAVFIT) projektfeladatokban résztvevő önkéntes tanulók munkáját és segítőkészségét.

## Felhasznált irodalom és hivatkozások

[1] European Parliament/ Lisbon European Council:

[http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1\\_en.htm](http://www.europarl.europa.eu/summits/lis1_en.htm)

[2] OECD-PISA Nemzetközi tanulói teljesítménymérés: <http://www.oecd.org/pisa/>

[3] Organisation for Economic Co-operation and Development: <http://www.oecd.org/>

[4] Balázsi I., Ostorics L. és Szalay B. (2007) *A ma oktatása és a jövő társadalma. PISA 2006 összefoglaló jelentés*, Oktatási Hivatal, Budapest.

[5] Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., and Walberg–Henriksson, H.(2007) *Science Education NOW: A renewed Pedagogy for the Future of Europe*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

[6] Rocard, M., Csermely P., Jorde, D., Lenzen, D., Walberg–Henriksson, H. és Hemmo, V. (2010) Természettudományos nevelés ma: megújult pedagógia Európa jövőjéért. *Iskolakultúra*, **12**, 13–30.

[7] Nagy Lászlóné (2010) A kutatásalapú tanulás/tanítás (IBL) és a természettudományok tanítása. *Iskolakultúra*, **12**, 31–51.

[8] Csíkos Cs. (2010) Problémaalapú tanulás és matematikai nevelés. *Iskolakultúra*, **12**, 52–60.

[9] Radnóti K. (2009) A természettudományi nevelés és a fizikaoktatás helyzete a 2008-as tanári felmérés tükrében. *Új Pedagógiai Szemle*, **59** (3), 3–16.



- [10] OKNT-Bizottság jelentése (2008) Javaslatok a természettudományos közoktatás magyarországi helyzetének javítására (szerk.: Ádám P., Baranyai J., Kertész J., és Szalay L.): [http://www.chem.elte.hu/w/modszertani/index\\_elemei/kt\\_elm\\_I\\_elemei/OKNT\\_JAVASLATO\\_K\\_VEGLEGES2008nov13.pdf](http://www.chem.elte.hu/w/modszertani/index_elemei/kt_elm_I_elemei/OKNT_JAVASLATO_K_VEGLEGES2008nov13.pdf)
- [11] Tél T. (2010) Bologna vagy tanárképzés? Tények és szubjektív megjegyzések a természettudományos tanárképzésről. *Fizikai Szemle*, **60** (3), 100-104.
- [12] Tél T. (2012) Milyen tudomány a fizika? Amit minden középiskolásnak tudnia kellene. *Természet Világa*, (12), 177–183.
- [13] ELTE Fizikai Intézet Professzori Tanácsának állásfoglalása a természettudomány-tanárok képzésének helyzetéről (2012) *Magyar Tudomány*, <http://www.matud.iif.hu/2010/02/13.htm>
- [14] Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnökségének véleménye a készülő NAT 2012 dokumentumról (2012) *Fizika Szemle*, **62** (4), 129–130.
- [15] Réti M. (2009) A természettudományok helyzete. in: *Szárny és teher, A magyar oktatás helyzetének elemzése - háttéranyag, A Bölcsék Tanácsa oktatási szakértői bizottságának és a bizottság által felkért szakértőknek az elemzése*, Bölcsék Tanácsa Alapítvány, 97–102.
- [16] Papp K. és Nagy A. (2007) Public Relation és a fizikatanítás - avagy hogyan tegyük vonzóvá a fizika tantárgyat. *Fizikai Szemle*, **57** (1), 18–24.
- [17] Kopasz K. és Papp K. (2008) Aktív tanulói eljárások a fizikatanításban. *A fizika tanítása*, **16** (3), 27–33.
- [18] Felvi honlap (Minden, ami felsőoktatás): <http://www.felvi.hu/>
- [19] Eduline oktatási honlap: [http://eduline.hu/felveteli\\_ponthatarok\\_2014](http://eduline.hu/felveteli_ponthatarok_2014)
- [20] Apró M. (2014) A régi és új típusú érettségi vizsgák összehasonlítása egy iskola 2000 és 2011 közötti eredményei alapján. *Módszertani Közlemények*, **54** (3), 75–84.
- [21] Oktatási Hivatal érettségi statisztikái:  
[http://www.oktatas.hu/kozneveles/erettsegi/statisztikak\\_vizsgaeredmenyek](http://www.oktatas.hu/kozneveles/erettsegi/statisztikak_vizsgaeredmenyek)
- [22] Báthory Z. (1999) Természettudományos nevelésünk. *Iskolakultúra*, (10), 46–54.
- [23] Knausz I. (2009) Interjú két ülésben - Horányi Gáborral I. *Taní-tani alternatív iskolai folyóirat*, (3), 17–25.
- [24] Hortobágyi K. (1991) *Projekt kézikönyv: Alternatív pedagógiák és módszerek*, Iskolafejlesztés Alapítvány - OKI Iskolafejlesztési Központ, ANTENUS-ERFAPRESS Kft.
- [25] Fülöp M. (2008) A kooperatív tanulás, A tanulók társas kapcsolatai, Együtt - működik. *Tanító és Tanár*, (1), 30–31.
- [26] Victor A. (1991) A természettudományos oktatásunk nemzetközi összehasonlítások tükrében. *Természet Világa*, (11), 510–512.
- [27] Ujházy A. (2004) Hagyjátok csodálkozni a gyerekeket! (avagy hogyan tanítsunk természettudományos tárgyakat). *Mester és Tanítvány*, (3), 121–128.
- [28] Korzenszky R. (2004) Tanítsunk? Neveljünk? *Mester és Tanítvány*, (4), 114–121.

- [29] Piskoltiné Tóth A. (2006) A kooperatív tanulás. *Módszertani közlemények*, (3), 89–94.
- [30] Dombi M. A. (2006) A projekt módszer alkalmazása a természettudományok oktatásában. *Módszertani közlemények*, (2), 55–58.
- [31] Dewey, J. (1900) *The School and Society*, Univ. of Chicago Press, Chicago.
- [32] Kilpatrick, W. H. (1919) *The project Method*, Teachers College Record, New York.
- [33] M. Nádasi M. (2003) *Projektoktatás: Elmélet és gyakorlat*, Gondolatok Kiadói Kör, Budapest.
- [34] Dewey, J. (1976) *A nevelés jellege és folyamata*, Tankönyvkiadó, Budapest.
- [35] Nemesné Müller M. (1933) Életegységben folyó tanítás a Családi Iskolában. *Magyar Paedagogia*, (11).
- [36] Pukánszky B. és Németh A. (1996) *Neveléstörténet*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [37] Németh L. (1945) A tanügy rendezése. Sarló Kiadó, Budapest.
- [38] Hegedűs G. (2002) *Projektpedagógia*, Kecskeméti Főiskola TFK, Kecskemét.
- [39] Széplaki E. (2008) Már nem elég lámpásnak lenni (Meváltozó pedagógiai szerepek). *Tanító és Tanár*, (1), 26–27.
- [40] Radnóti K. (2008) A projekt módszer alkalmazásának gyakorisága a közoktatásban. in: *A projektpedagógia mint az integrált nevelés egy lehetséges eszköze* (szerk. Radnóti K.), Educatio Társadalmi Szolgáltató Közhasznú Társaság, Budapest, 11–22.
- [41] Radnóti K. (2008) Pedagógiai koncepció. in: *A projektpedagógia mint az integrált nevelés egy lehetséges eszköze* (szerk. Radnóti K.), Educatio Társadalmi Szolgáltató Közhasznú Társaság, Budapest, 23–62.
- [42] Woynarovich F. (2012): Milyen tantárgy a fizika? *Fizika Szemle*, **62** (6), 205-207.
- [43] Woynarovich F. (2014): Gondolatok a „modell” fogalom használatáról. *Fizika Szemle*, **64** (3), 103-106.
- [44] Radnóti K., Nahalka I., Poór I. és Wagner É. (2002) *A fizikatanítás pedagógiája*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [45] Szabó G. (2006) *Hogyan lehet egyszerre játékos és tudományos a fizika?* Mindentudás Egyeteme:  
<http://mindentudas.hu/el%C5%91ad%C3%A1sok/tudom%C3%A1nyter%C3%BCletek/term%C3%A9szettudom%C3%A1ny/103-fizikai-tudom%C3%A1nyok/6131-hogyan-lehet-egyszerre-jatekos-es-tudomanyos-a-fizika-49749755.html>
- [46] Mérés és modellezés (Méréstechnika – VM, GM, MM):  
[http://www.aut.vein.hu/oktatok/gerzsonm/model\\_bev\\_mvg\\_08.pdf](http://www.aut.vein.hu/oktatok/gerzsonm/model_bev_mvg_08.pdf)
- [47] Tasnádi P., Juhász A. és Horváth G. (1994) *Fizika körülöttünk*. Múzsák Kiadó Reál Szerkesztősége.
- [48] Horváth G., Juhász A., és Tasnádi P. (1989) *Mindennapok fizikája*. ELTE TTK Továbbképzési Csoportjának Kiadványa, Budapest.

- [49] Ádám P., Egri S., Elblinger F., Honyek Gy., Horányi G. és Simon P. (2015) *Fizika 9 (kísérleti tankönyv)*. Oktatókutatató és Fejlesztő Intézet, Reálszisztéma Dabasi Nyomda Zrt.
- [50] Teiermayer A. (2013) Kísérletek, fényképek és videofelvételek alkalmazása a fizikaoktatásban. A fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban. (szerk.: Juhász A. és Tél T.) ELTE Konferencia-kiadvány, Budapest, 285–290.
- [51] Medvegy T. (2014) Okostelefonok a fizikaoktatásban. *Fizikai Szemle*, **64** (3), 97–102.
- [52] United Nations World Population Prospects: <http://esa.un.org/wpp/>
- [53] U.S. Department of Energy: <http://www.energy.gov/>
- [54] Kiss Á. (2014) *Energiatermelés és környezet*. ELTE, Fizika tanítása Ph.D. előadás jegyzet.
- [55] Simonyi K. (1978) *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest.
- [56] MTI: 60 éves a világ első atomerőműve: [http://hvg.hu/kkv/20140625\\_60\\_eves\\_Obnyinszk](http://hvg.hu/kkv/20140625_60_eves_Obnyinszk)
- [57] Hidrogénbomba története: [http://people.inf.elte.hu/neduabi/hidrogen\\_bomba.html](http://people.inf.elte.hu/neduabi/hidrogen_bomba.html)
- [58] Fúzió - A jövő energiája: <http://magfuzio.hu/>
- [59] Ádám P., Egri S., Elblinger F., Honyek Gy., Horányi G. és Simon P. (2015) *Fizika 10 (kísérleti tankönyv)*. Oktatókutatató és Fejlesztő Intézet, Reálszisztéma Dabasi Nyomda Zrt.
- [60] Sawin, J. L. et al (ed. Mastny, L.) (2013) *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2013: Global Status Report*. Sunna Research and Worldwatch Institute, REN21 Secretariat, Paris, France.
- [61] Láng I. (szerk.) (2002) *Környezet- és természetvédelmi lexikon I-II*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- [62] Csom Gy. (2006): *A nukleáris energia szerepe a jövő energiaellátásában, különös tekintettel a paksi atomerőmű jövőjére*. Tanulmány. Budapest.
- [63] Csom Gy. (2007) Energiapolitikai prioritások. *Magyar Tudomány* 01-04.  
<http://www.matud.iif.hu/07jan/03.html>
- [64] Paksi Atomerőmű honlapja: <http://www.atomeromu.hu/hu/Lapok/default.aspx>
- [65] GKI Energiakutató Kft. honlapja: <http://gkienergia.hu>
- [66] Energia Centrum - Napfény jellemzői: <http://www.energiacentrum.com/energetika/a-napenergia-fobb-jellemzoi-napsugarzasi-viszonyok/>
- [67] Blasone M, Dell’Anno F, De Luca R and Torre G (2013): A simple mathematical description of an off-grid hybrid solar–wind power generating system *Eur. J. Phys.* **34** (3), 763–71.
- [68] Solar panel: <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/power/2-how-efficient-are-solar-panels.html>
- [69] Solar panel efficiency: <http://pureenergies.com/us/how-solar-works/solar-panel-efficiency/>
- [70] Measuring of solar panel’s efficiency: <http://www.pvpower.com/assets/Measuring-PV-Efficiency-Solar-Panels.pdf>
- [71] Betz' law and coefficient of performance: [https://en.wikipedia.org/wiki/Betz's\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Betz's_law)

- [72] Betz, A. (1966) *Introduction to the Theory of Flow Machines*. Oxford: Pergamon Press.
- [73] Betz limit: <http://www.wind-power-program.com/betz.htm>
- [74] Wind turbine technology: <http://www.power-eng.com/articles/print/volume-118/issue-3/features/advancements-in-wind-turbine-technology-improving-efficiency-and-reducing-cost.html>
- [75] De Luca R and Desideri P. (2013) Wind energy: an application of Bernoulli's theorem generalized to isentropic flow of ideal gases *Eur. J. Phys.* **34** (1), 189–97.
- [76] Budó Á. (1997) *Kísérleti fizika I.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [77] Budó Á. (1997) *Kísérleti fizika III.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [78] Energy-Efficient Air Conditioning: <http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/17467.pdf>
- [79] Air Conditioning System Efficiency: <http://www.powerknot.com/how-efficient-is-your-air-conditioning-system.html>
- [80] MacKay, D. J. C. (2009) *Sustainable Energy - Without the Hot Air*, UIT Cambridge Ltd, Cambridge.
- [81] Érdekességek az óraátállításról: <http://www.erdekesvilag.hu/erdekessegek-az-oraatallitasrol/>
- [82] Óraátállítás jellemzői: <http://www.erdekesvilag.hu/erdekessegek-az-oraatallitasrol/>
- [83] MAVIR ZRt. honlapja: <https://www.mavir.hu/web/mavir/home>
- [84] Néda Z. (2014) *Kollektív viselkedések: kísérletek, modellezés, elméleti eredmények és interdiszciplináris vonatkozások*. ELTE, Fizika tanítása Ph.D. előadás jegyzet.
- [85] Néda Z. és Káptalan E. (2009) A sokaság ritmusa. *Fizikai Szemle*, **59** (9), 301–305.
- [86] Palmer, H. B. and Beér, J. M. (1974) *Combustion Technology: Some Modern Developments*. Academic Press, New York.
- [87] Sarpotdar, S. M., Ananthkrishnan, N. and Sharma, S. D. (2003) The Rijke Tube - a Thermo-acoustic Device. *Resonance*, **8** (1), 59–71.
- [88] Matveev, K. I. and Culick, F. E. C. (2003) A model for combustion instability involving vortex shedding. *Combustion Science and Technology*, **175**, 1059–1083.
- [89] Higgins, B. (1802) Singing Flame. *Journal of Natural Philosophy and Chemical Arts*, **1**, 129.
- [90] Rijke, P. L. (1859) Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Enden offenen Röhre enthaltene Luft in Schwingungen zu versetzen, *Annalen der Physik*, **2** (107), 339–343.
- [91] Lord Rayleigh (Strutt, J. W.) (1878) The explanation of certain acoustical phenomena. *Nature*, **18**, 319–321.
- [92] Lord Rayleigh (Strutt, J. W.) (1879) Acoustical observations. *Philosophical Magazine*, **5** (7), 149–162.
- [93] Lord Rayleigh (Strutt, J. W.) (1896) *The Theory of Sound*, **2**, (2nd ed.), Macmillan, London.

- [94] Merk, H. J. (1957) Analysis of heat-driven oscillations of gas flows. *Applied Scientific Research*, **A 6**, 402–420.
- [95] Matveev, K. I. (2003) *Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling*. Ph.D. thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- [96] Culick, F. E. C. and Yang, V. (1992) Prediction of the stability of unsteady motions in solid-propellant rocket motors. in: *Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants*, (edited by DeLuca, L., Price, E. W. and Summerfield, M.), *Progress in Astronautics and Aeronautics*, AIAA, NY, **143**, 719–780.
- [97] Pun, W. (2001) *Measurements of Thermo-Acoustic Coupling*, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena.
- [98] Fahey, D. and Timbie, P. (2006) Thermoacoustic Oscillations. *Wave Motion and Optics*, Springer, 1–9.
- [99] Levine, H. and Schwinger, J. (1948) On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical Review Letters*, **73**, 383–406.
- [100] Entezam, B., Van Moorhem, W. K. and Majdalani, J. (2002) Two-dimensional numerical verification of the unsteady thermoacoustic field inside a Rijke-type pulse combustor. *Numerical Heat Transfer*, **A 41**, 245–262.
- [101] Audacity program: <http://audacityteam.org/>
- [102] Torczynski, J. R. and O'Hern, T. J. (1995) Reynolds number dependence of the drag coefficient for laminar flow through electrically-heated photoetched screens. *Experiments in Fluids*, **18**, 206–209.
- [103] Lienhard, J. W. IV. and Lienhard, J. W. V. (2003) *A Heat Transfer Textbook* (3rd edition) Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts.
- [104] Lighthill, M. J. (1954) The Response of Laminar Skin Friction and Heat Transfer to Fluctuations in the Stream Velocity. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Published by Royal Society, **224** (1156) 1–23.
- [105] Bene Gy. *Áramlások fizikája* (ELTE előadás jegyzet 9. előadás):  
[http://arpad.elte.hu/~bene/hidro/eloadas/9\\_eloadas/9\\_eloadas.html](http://arpad.elte.hu/~bene/hidro/eloadas/9_eloadas/9_eloadas.html)
- [106] Matveev, K. I. and Culick, F. E. C. (2003) Limit-Cycle Properties of a Rijke Tube. *Technical Acoustics*, **12**, 1–13.
- [107] Culick, F. E. C. (1976) Nonlinear behavior of acoustic waves in combustion chambers. Parts I and II. *Acta Astronautica*, **3**, 714–757.
- [108] Kwon, Y. P. and Lee, B. H. (1985) Stability of the Rijke thermoacoustic oscillation. *Journal of the Acoustical Society of America*, **78** (4), 1414–1420.
- [109] Howe, M. S. (1998) *Acoustics of Fluid-Structure Interactions*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [110] Tóthné Parázsó L. (2011) *A kutatómódszertan matematikai alapjai*. (Médiainformatikai kiadványok sorozat szerk. Kis-Tóth L.) EKF, Eger.

## Saját publikációk

### A dolgozat alapjául szolgáló saját publikációk

- [B1] Beke T. (2014) A projekt módszer alkalmazása a fizika és az informatika tanításában. *Módszertani Közlemények*, **54** (4), 13–26.
- [B2] Beke T. (2011) A projekt munka hatásai a természettudományos tantárgyak tanulásában. *Iskolakultúra*, **11** (4–5), 3–21.
- [B3] Beke T. (2013) A gépjárművek meghajtási lehetőségeinek vizsgálata iskolai projekt feladatban. *Módszertani Közlemények*, **53** (2), 39–52.
- [B4] Beke T. (2013) Moduláris elvű gépjármű tervezése iskolai projekt feladatban. *Módszertani Közlemények*, **53** (3), 42–52.
- [B5] Beke T. (2014) Közlekedéshez kapcsolódó iskolai projekt feladat. *Módszertani Közlemények*, **54** (1), 12–24.
- [B6] Beke T. (2015) Kerékpár mozgási jellemzőinek meghatározása iskolai projekt feladatban. *Fizikai Szemle*, **65** (10), 344–348.
- [B7] Beke T. (2014) Megújuló energiaforrások vizsgálata iskolai projekt feladatban. *Módszertani Közlemények*, **54** (3), 56–74.
- [B8] Beke T. (2015) A nap- és a szélenergia lakossági felhasználási lehetőségeinek modellezése iskolai projekt feladatban. *Fizikai Szemle*, **65** (7-8), 263–269.
- [B9] Beke, T. (2016) A simple model for the energy supply of a stand-alone house using a hybrid wind–solar power system. *European Journal of Physics*, **37** (1) 015804, 1–19.
- [B10] Beke T. (2014) Az óráátállítás hatásainak vizsgálata. *Fizikai Szemle*, **64** (11), 388–392.
- [B11] Beke T. (2015) Színes kaméleonok fázisátalakulása. *Fizikai Szemle*, **65** (1), 18–23.
- [B12] Beke T. (2011) Termoakusztikai érdekességek. *Fizikai Szemle*, **61** (5), 165–169.
- [B13] Beke T. (2009) Termoakusztikus jelenségek vizsgálata iskolai projekt feladatban. *A fizika tanítása*, **17** (4), 7–14.
- [B14] Beke T. (2009) Termoakusztikus projekt feladat Rijke-cső vizsgálatára. *Fizikai Szemle*, **59** (7–8), 253–257.
- [B15] Beke T. (2010) Termoakusztikus iskolai projekt feladat Rijke-csővel. in: *Fizikatanítás Tartalmasan és Érdekesen* (szerk. Juhász András és Tél Tamás), ELTE, Fizika Doktori Iskola, Budapest, 453–460.
- [B16] Beke, T. (2009) Observation of thermoacoustic phenomena in a school project. *Physics Education*, **44** (5), 536–548.
- [B17] Beke, T. (2009) Thermoacoustic school project. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (2), 9–24.
- [B18] Beke T. (2014) Termoakusztikus hanghatás vizsgálata Rijke-cső segítségével. *Fizikai Szemle*, **64** (7-8), 256–261.
- [B19] Beke T. (2010) Elektromosan fűtött Rijke-cső termoakusztikus modellje. *Fizikai Szemle*, **60** (9), 305–311.

- [B20] Beke, T. (2010) Thermoacoustic school project work with an electrically heated Rijke tube. *Physics Education*, **45** (5), 516–528.
- [B21] Beke, T. (2010) Modelling of thermoacoustic phenomena in an electrically heated Rijke tube. *European Journal of Physics*, **31** (6), 1331–1344.
- [B22] Beke, T. (2011) Rijke-type thermoacoustic oscillations. *European Journal of Physics*, **32** (2), 305–327.
- [B23] Beke, T. (2012) Heat transfer in a thermoacoustic process. *European Journal of Physics*, **33** (6), 1487–1503.
- [24] Beke T. (2016) Az iskolai projektmunka hatásainak kérdőíves vizsgálata. *Módszertani Közlemények*, **56** (Közlésre elfogadott cikk.)

### **Egyéb saját publikációk**

- [B25] Beke, T. (2009) Professional scientific blog. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (1), 49–58.
- [B26] Beke, T. (2009) Application of the table manager program in the physics education. *Acta Didactica Napocensia*, **2** (3), 61–74.
- [B27] Beke T. (2009) Az atomenergia szerepe hazánk energiaellátásában. *A fizika tanítása*, **17** (2), 18–24.
- [B28] Beke T. (2008) Lézerek alkalmazása az orvostudományban. *A fizika tanítása*, **16** (2), 14–19.
- [B29] Beke T. (2008) Az orvosi és a kozmetológiai gyakorlatban használt lézerek és kezelési módszerek. *A fizika tanítása*, **16** (3), 3–10.
- [B30] Beke T. (2008) A szeméttengeren innen, az üveghegyen túl. *A fizika tanítása*, **16** (4), 7–13.
- [B31] Beke T. (2008) Iskolánövérék Kalocsán. *Neveléstörténet*, 5 (1-2), 72–102.

### **Összegzés**

Általános tapasztalat, hogy a tanulók többsége a fizika tantárgyat nehéznek, bonyolultnak tartja. A hagyományos elven oktatótt fizika és más természettudományos tantárgyak a legtöbb gyermek számára népszerűtlenné, érthetlenné, és felesleges nyüggnek számítanak. Ezen a helyzeten mindenképpen változtatnunk kell.

Olyan tartalmú és módszerű iskolai természettudományos oktatás szükséges, melyben tanulóinkat felkészítjük a természettudományos és technológiai újításokra, a környezetünk összefüggéseinek megértésére. A természettudományos iskolai projektfeladat e célok elérésének egyik eszköze lehet. Az iskolai projektek közös célja a diákok aktivitásának növelése.

A dolgozatban olyan projektek kidolgozásának és megvalósításának a részleteit mutatom be, melyekben gimnazista tanulók a vezetésem mellett szisztematikus megfigyelőmunkát végeztek. A projektekben a tanulók ismeretlen témákat dolgoztak fel, amelyek a középiskolai tananyagban nem, vagy csak részben szerepelnek. A projektekkel a tanulók természettudományos szemléletmódját kívántam fejleszteni. A tapasztalataim szerint a tanulók szívesen foglalkoztak a szokásos tananyagon kívül eső témakörökkel. A projektfeladatok során rengeteg kísérletet, mérést végeztünk, számítógépes modelleket, szimulációkat készítettünk.

A dolgozatban ismertetett iskolai projektfeladatok a fizika különböző témaköreihez tartoznak. Az értekezésben olyan, a gyakorlatban általunk kipróbált projekteket mutatok be, amelyek segíthetik a diákokat a természettudományos ismeretek komplexebb szemléletű megértésében. A projektek célja az volt, hogy a tanulók fizikai ismereteinek bővítése mellett egyrészt az alkalmazott informatikai és matematikai tudásuk is gyarapodjon, másrészt a team-munka jellegű képességeik és készségeik is fejlődjenek.

Megmutattam, hogy a projektmódszer alkalmas a megújuló és a nem megújuló energiaforrások szerepének vizsgálatára. Iskolánk gimnazista tanulóival megvalósítottam egy projektfeladatot, amelyben összegyűjtöttük a legfontosabb ismereteket az energetikai szektor jellemzőiről; vizsgáltuk az energiaforrások szerepét, és modelleztük a megújuló energiaforrások egy lehetséges lakossági felhasználását (napelemekkel és szélgenerátorral üzemelő lakóház).

A színes kaméleonok projektben megmutattam, hogy a fázisátalakulásokkal kapcsolatos fogalmak és jelenségek a középiskolában olyan számítógépes játékprogrammal is szemléltethetők, melyben egy terráriumban élő, meghatározott szabályok szerint mozgó és szint-váltó kaméleonok kollektív viselkedése tanulmányozható. A számítógépes programot a fizika és az informatika iránt érdeklődő gimnazista diákokkal együttműködve fejlesztettem ki szakköri projektmunkában.

A termoakusztikához kapcsolódó projektfeladatban a termoakusztikai jelenségek tanulmányozásához olyan kísérleteket gyűjtöttem, alakítottam át, illetve fejlesztettem ki, melyek olcsó, minden oktatási intézményben megtalálható eszközökkel végezhetőek el. A kísérletek alacsony költségből megvalósíthatók ezért a középszintű oktatásban bárhol alkalmazhatók. Megmutattam, hogy a termoakusztikus jelenségek szemléltetésére alkalmas Rijke-cső középiskolai projektfeladatok keretében vizsgálható. Egyszerű kísérleti eszközökkel meghatározható a paraméterek változtatásának hatása, és a cső működése középiskolai szintű elméleti módszerekkel kvantitatívan értelmezhető.

A dolgozatban a természettudományos tantárgyak közötti integráció lehetőségeit is vizsgáltam. Véleményem szerint a természettudományos oktatás kezdő és befejező szakaszában az integrált természettudományos projektfeladatok segíthetik a tanulóinkat abban, hogy a természet komplex viselkedését jobban megértsék. Az integrált természettudományos projektekkal izgalmasabbá tehetjük a tanulási folyamat fáradtságos munkáját. Megmutattam, hogy a természettudományos tantárgyak komplex szemléletű oktatása motiváló erővel hat a diákokra a fizika tanulásának folyamatában. Kidolgoztam több tématervet, amelyben az ismereteket konkrét témák köré szerveztem; ez újszerű megközelítést jelent hazánkban a fizika tanításának hagyományosan elfogadott, megszokott felépítéséhez képest. Bemutattam, hogy a természettudományos tananyag ilyen témaegységek köré felépített rendszere lehetőséget nyújt arra, hogy a kevésbé motivált tanulókat is bevonjuk a tanítási-tanulási folyamatba.



A projektek hatására a diákok tudásszintje növekszik, ismereteik bővülnek és a képességeik, kompetenciáik is fejlődnek. Az iskolai projektek folyamán vizsgáltam a módszer használhatóságát, hatékonyságát a résztvevő diákok közép, illetve hosszabb távú tanulmányi teljesítményét illetően. Bemutattam, hogy a fizika tantárgy tanításának módszertanába hatékonyan illeszthető a tanulói projektmunka. Az általam kifejlesztett és a tanulókkal közösen megvalósított projektfeladatok elősegítették a diákok fizika tudásanyagának gyarapodását, és fejlesztették a fizikai szemléletmódjukat, gondolkodásukat.

## **Summary**

Physics is regarded as a very difficult and intricate subject that students learn discontentedly. Teaching Physics with the traditional methods are unpopular and unintelligible, and considered unnecessary for most students. Learning Physics can be a difficult task and students can get discouraged, but this situation needs to be improved.

There is an obvious need to prepare young people for the future that will require profound scientific knowledge and an understanding of technology and environment. The scholastic natural scientific project can answer these purposes.

In my dissertation I show the details of the planning and execution of projects in which secondary school students made systematic observations. In the course of the projects students elaborated unknown topics which are not part of the curriculum or only partly appear in it. My aim with the project work was to improve the students' approach to science. Based on my experience, students fancy working on topics outside the regular curriculum. During the projects we did a plenty of experiments, took several measurements and made computer models and simulations.

In my dissertation I presented some school project works related to different fields of Physics. The project works presented in the dissertation were tried and tested and can help students to understand the science subjects in an interdisciplinary sense. The aim of our projects was while students enlarged their knowledge about Physics; on the one hand they developed their applied information technological (IT) and Mathematical skills, while on the other, their cooperative skills were improved as well. Our school projects promoted a pedagogy using an inquiry-based approach.

In the energy project I showed that project method is a suitable tool to examine the role of renewable and non-renewable energy sources. With the help of our secondary school students I have carried out a project in which we collected the most important pieces of information about the features of the energy sector, we also examined the roles of energy sources and modelled a possible way to use the renewable energy sources for residential purpose (a house with solar panels and wind turbines).

In the colourful chameleons project the notions and features connected to phase transition were presented with a computer game in which the collective behaviour of chameleons that live in a terrarium and move and change their colours according to certain rules can be studied. This programme was developed with the help of students who were interested in Physics and IT at extracurricular Physics lessons.

In the thermoacoustic project I collected, transformed and developed thermoacoustic experiments which can be carried out with cheap equipments which can be found in every school. These experiments help teachers of physics to perform students' experiments with simple equipments. I showed, that the Rijke tube, which is appropriate for showing the thermoacoustic phenomenon, can be examined in secondary school project tasks, the effects of the changing of its parameters can be determined with simple testing tools and its function can be understood quantitatively with theoretical methods on secondary school level.

In my dissertation I examined the possibilities of integration in science subjects too. In my view, integrated science projects can help students get a better understanding of the behaviour of the nature in the introductory and final part of their science education. With integrated science projects we can make the exhausting learning process more exciting. I have revealed that the complex, integrated education of science subjects has motivating effect on students in Physics education process. I worked out plans for different topics in which I used the method to organize the curriculum around a given topic which is a new approach in teaching physics in our country compared to the traditionally accepted and widely used methods. I proved that organizing the science material in such topics enables the integration of weaker students in the learning process.

The science projects help to boost the students' knowledge and to develop their skills and competence. In the course of the projects I examined the applicability and efficiency of them on the medium- and long-term performance of the participants. I presented that the student project work can be used efficiently in teaching Physics. The project tasks that I developed and carried out with the students helped them to enhance their knowledge in Physics and adopt a physical way of thinking.

## <sup>38</sup>ADATLAP

### a doktori értekezés nyilvánosságra hozatalához

#### I. A doktori értekezés adatai

A szerző neve: Beke Tamás

MTMT-azonosító: 10049483

A doktori értekezés címe és alcíme:

A fizika tantárgyhoz kapcsolódó természettudományos iskolai projektfeladatok kidolgozása és vizsgálata

DOI-azonosító<sup>39</sup>: 10.15476/ELTE.2016.010

A doktori iskola neve: ELTE Fizika Doktori Iskola

A doktori iskolán belüli doktori program neve: Fizika Tanítása Doktori Program

A témavezető neve és tudományos fokozata: Dr. Bene Gyula egyetemi docens, a fizikai tudomány kandidátusa

A témavezető munkahelye: ELTE TTK Fizikai Intézet, Elméleti Fizikai Tanszék

#### II. Nyilatkozatok

A doktori értekezés szerzőjeként<sup>40</sup>

a) hozzájárok, hogy a doktori fokozat megszerzését követően a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban. Felhatalmazom a Természettudományi Kar Tudományszervezési és Egyetemközi Kapcsolatok Osztályának ügyintézőjét Bíró Évát, hogy az értekezést és a téziseket feltöltse az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba, és ennek során kitöltse a feltöltéshez szükséges nyilatkozatokat.

b) kérem, hogy a mellékelt kérelemben részletezett szabadalmi, illetőleg oltalmi bejelentés közzétételéig a doktori értekezést ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;<sup>41</sup>

c) kérem, hogy a nemzetbiztonsági okból minősített adatot tartalmazó doktori értekezést a minősítés (dátum)-ig tartó időtartama alatt ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;<sup>42</sup>

d) kérem, hogy a mű kiadására vonatkozó mellékelt kiadó szerződésre tekintettel a doktori értekezést a könyv megjelenéséig ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban, és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban csak a könyv bibliográfiai adatait tegyék közzé.

Ha a könyv a fokozatszerzést követően egy évig nem jelenik meg, hozzájárlok, hogy a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban.<sup>43</sup>

2. A doktori értekezés szerzőjeként kijelentem, hogy

a) az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba feltöltendő doktori értekezés és a tézisek saját eredeti, önálló szellemi munkám és legjobb tudomásom szerint nem sértem vele senki szerzői jogait;

b) a doktori értekezés és a tézisek nyomtatott változatai és az elektronikus adathordozón benyújtott tartalmak (szöveg és ábrák) mindenben megegyeznek.

3. A doktori értekezés szerzőjeként hozzájárlok a doktori értekezés és a tézisek szövegének plágiumkereső adatbázisba helyezéséhez és plágiumellenőrző vizsgálatok lefuttatásához.

Kelt: Budapest, 2016. 03. 10.

Beke Tamás

#### a doktori értekezés szerzőjének aláírása

<sup>38</sup> Beiktatta az Egyetemi Doktori Szabályzat módosításáról szóló CXXXIX/2014. (VI. 30.) Szen. sz. határozat. Hatályos: 2014. VII.1. napjától.

<sup>39</sup> A kari hivatal ügyintézője tölti ki.

<sup>40</sup> A megfelelő szöveg aláhúzendó.

<sup>41</sup> A doktori értekezés benyújtásával egyidejűleg be kell adni a tudományági doktori tanácshoz a szabadalmi, illetőleg oltalmi bejelentést tanúsító okiratot és a nyilvánosságra hozatal elhalasztása iránti kérelmet.

<sup>42</sup> A doktori értekezés benyújtásával egyidejűleg be kell nyújtani a minősített adatra vonatkozó közokiratot.

<sup>43</sup> A doktori értekezés benyújtásával egyidejűleg be kell nyújtani a mű kiadásáról szóló kiadói szerződést.